

SISTEMA MULTIESPECTRAL DE ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE IMAGEN EN EL INFRARROJO

Autor: Miguel Ángel Rodríguez Conejo

Tutor: Juan Meléndez Sánchez

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Leganés, octubre de 2010

Agradecimientos

Es complicado agradecer a todas las personas que me han ayudado sin olvidar a nadie, por lo que si alguien lee esta memoria y piensa que debe aparecer aquí probablemente llevará razón.

Pese a ello, me vienen a la cabeza todas las personas sin las cuales no estaría ahora escribiendo estos agradecimientos y, los primeros de todos, mis padres, que me han apoyado y ayudado siempre durante este camino tan largo.

Inmediatamente después mis amigos y mi novia, que han sufrido mi falta de tiempo durante estos últimos meses y espero que estén preparados porque he vuelto...

También me gustaría agradecer este trabajo a dos de las personas que más se han esforzado y me han ayudado para que todo haya salido adelante. Ellos son Jose Manuel Aranda y Juan Meléndez, de los que creo que me queda muchísimo que aprender.

Y, por supuesto, no se me podía olvidar agradecer al equipo del LIR al completo toda la ayuda recibida y por hacer que cada día con ellos se me haya pasado con una sonrisa.

Gracias a todos.

Resumen

El presente proyecto aborda la implementación de un sistema multiespectral para la adquisición de imágenes dentro del espectro infrarrojo. La estrategia que seguiremos partirá de una cámara de infrarrojos convencional pero de un gran ancho de banda, a la que dotaremos de características de selección espectral mediante el empleo de una rueda portafiltros. Dicha rueda contendrá un conjunto de filtros interferenciales paso banda, pudiendo seleccionar sus características de anchura espectral y longitud de onda central de acuerdo a nuestras necesidades.

Apoyándonos en una serie de elementos (tales como un motor eléctrico, una electrónica de control y una tarjeta de adquisición), trataremos de capturar imágenes en distintas bandas del espectro de la forma más rápida posible. Para ello desarrollaremos una aplicación software encargada de la gestión, sincronización y control del conjunto de elementos que conformarán nuestro sistema.

Gracias a un análisis basado en el cálculo de componentes principales, la información más relevante contenida en el conjunto de las bandas, podrá ser sintetizada en una sola variable. Dicho procesado será implementado de forma paralela a las labores de adquisición y nos resultará de gran utilidad en tareas de clasificación.

Palabras clave: imagen infrarroja, sistema multiespectral, tecnología infrarroja, análisis de componentes principales, procesado digital.

Abstract

This project deals with the implementation of a multispectral image acquisition system in the infrared region of the electromagnetic spectrum. In order to carry out its implementation, the strategy we will follow will begin with a conventional infrared camera of high bandwidth, which we will provide with spectral selection capabilities by means of a filter wheel. The mentioned wheel will contain a collection of band pass interference filter, so that we can choose the bandwidth and the central wavelength characteristics fitted to our needs.

Using several elements (such as an electric motor, a control electronics or a signal acquisition device), we will attempt to capture images in different spectral bands in the fastest way possible. To this end we will develop a software application in charge of the management, synchronization and control of the set of elements that will form our system.

Thanks to a principal components based analysis, the most relevant information contained in each one of the bands will be synthesized in a single variable. This processing will be implemented in parallel with the acquisition tasks and it will be very useful to solve classification problems.

Keywords: infrared image, multispectral system, infrared technology, principal components analysis, digital processing.

Introducción y objetivos

Introducción

Cada uno de nosotros interacciona con el espacio que nos rodea (y con los elementos que en él se encuentran) gracias a la información que nos aportan nuestros sentidos. De modo que nuestra capacidad sensorial, y por tanto la cantidad y el tipo de información que podemos percibir, se encuentra gravemente limitada, privándonos el acceso directo a la experimentación de cierto tipo de fenómenos.

Un claro ejemplo de lo anterior lo podemos encontrar en lo que comúnmente se denomina como dominio de la frecuencia, en contraposición al dominio del tiempo al que estamos habituados. Sin embargo, gracias a las herramientas matemáticas de las que disponemos somos capaces de caracterizar perfectamente dicho dominio, pese a no poder percibirlo directamente, y así extraer y explotar todas las posibilidades que nos ofrece.

Cuando tomamos una instantánea con una cámara de fotos convencional, podemos distinguir en la imagen tomada una cierta resolución espacial de carácter bidimensional. Sin embargo, también podría resultarnos interesante, dependiendo de nuestra aplicación concreta, poder tener acceso a las tres dimensiones espaciales, como recientemente se esta consiguiendo. O incluso, podríamos precisar de una tercera dimensión espectral para determinados tipos de análisis.

Precisamente la adquisición de imágenes en distintas bandas del espectro, puede sernos de gran utilidad en labores de distintos ámbitos, como son las relacionadas con tareas de clasificación o de caracterización de materiales. A veces incluso será necesario disponer de información acerca de bandas alejadas en el dominio espectral, para lo que a su vez requeriremos dispositivos de adquisición con un ancho de banda elevado.

Si dispusiéramos de un dispositivo capaz de proporcionarnos ambas resoluciones, espacial y espectral, la cantidad de información que manejaríamos

crecería de forma considerable. Entonces sería también interesante contar con herramientas de procesado que, por ejemplo, nos mostraran sólo la información relevante o aquella difícil de distinguir a simple vista.

Objetivos

En base a esta problemática, nuestro proyecto cuenta con dos objetivos fundamentales:

- Dotar de resolución espectral a una cámara infrarroja convencional de banda ancha, de modo que nos permita obtener en instantes próximos en el tiempo imágenes correspondientes a diferentes bandas del espectro.
- Dotar al sistema de selección espectral de herramientas de procesado digital, de forma que, paralelamente a la adquisición, podamos tener acceso a información adicional acerca del fenómeno que estudiemos en ese momento.

Estructura de la memoria

A la hora de abordar la descripción del trabajo realizado, dividiremos nuestra memoria en cinco partes fundamentales:

- La primera de ellas tratará de proporcionar al lector una **introducción al ámbito de la tecnología infrarroja** y, particularmente, a los sistemas de adquisición. Dicha introducción constará de los siguientes capítulos:
 - En el *capítulo 1* llevaremos a cabo una breve descripción del espectro infrarrojo, englobándolo dentro del espectro electromagnético y, describiendo a su vez los elementos principales que componen un sistema de adquisición en el ámbito infrarrojo.
 - Tras esto, en el *capítulo 2* presentaremos las fuentes de radiación más usuales (las cuales serán el objeto de nuestra medida) a través de las leyes fundamentales que las gobiernan.
 - El *capítulo 3* estará dedicado a la descripción de los parámetros de mayor importancia para un sistema óptico simple. Junto a ellos serán también presentados los filtros interferenciales, que serán los que nos confieran la propiedad de selección espectral.

- En el *capítulo 4* realizaremos un análisis de los detectores infrarrojos, mostrando primero sus parámetros más relevantes. A lo que seguirá una breve descripción de cada uno de los tipos que podemos distinguir si atendemos a su principio de funcionamiento.
- La segunda parte de la memoria se corresponde con el primero de los objetivos planteados en este proyecto: **la construcción de un sistema de selección espectral**. Para su descripción emplearemos los siguientes capítulos:
 - Primeramente, en el *capítulo 5* llevaremos a cabo un análisis de todos los elementos hardware utilizados, ya que sus características condicionarán el modo en que abordemos la gestión del sistema completo. Esto será de gran importancia para comprender los posteriores capítulos.
 - En el *capítulo 6* explicaremos el principio funcionamiento en el que se basa nuestro sistema multiespectral, de forma que ayude a la comprensión del software desarrollado.
 - A lo largo del *capítulo 7* realizaremos un análisis detallado de la implementación software. Primero daremos una pequeña introducción a la plataforma de programación LabView, para después describir el código empleado y la interfaz gráfica asociada a éste.
- Posteriormente, la tercera parte hará referencia a los **aspectos relacionados con el procesamiento digital multiespectral**, que representa el segundo de los objetivos mencionados. Esta parte quedará dividida en los siguientes capítulos:
 - En el *capítulo 8* realizaremos una introducción al cálculo de componentes principales, describiendo tanto las ventajas que nos aporta dicho procesamiento como su descripción matemática, en la que basaremos su posterior implementación.
 - A lo largo del *capítulo 9* describiremos la aplicación desarrollada para el análisis por componentes principales. Dicha aplicación hará uso de dos entornos diferentes, LabView y Matlab, por lo que analizaremos por un lado las relaciones entre ambos y, por otro, el contenido de cada uno de ellos de forma independiente.

- En la cuarta parte de la memoria se exponen tanto los **experimentos** llevados a cabo como las **conclusiones** y **líneas futuras**:
 - Por un lado, en el *capítulo 10* se describirán los experimentos realizados. Ello nos valdrá tanto para demostrar el correcto funcionamiento de nuestro trabajo como para realizar una justificación práctica del mismo.
 - Tras esto, el *capítulo 11* contiene las conclusiones generales del proyecto desarrollado, así como las futuras líneas de desarrollo que proponemos y el objetivo de las mismas.
- Finalmente, la quinta y última parte de la memoria estará compuesta de cuatro **anexos**, que contienen la siguiente información:
 - El *Anexo I* aborda la descripción estadística del promediado de imágenes.
 - En el *Anexo II* se incluye el presupuesto global del proyecto.
 - El *Anexo III* contiene los esquemas asociados a la electrónica de control.
 - Por último, en el *Anexo IV* se encuentran los planos de fabricación correspondientes al sistema portafiltros.

Visión general del proyecto

Este apartado nos servirá para confeccionar una visión general de la solución escogida en base a la problemática planteada, sobre la que basaremos nuestro diseño, así como de una presentación de los diversos componentes que emplearemos y el lugar que cada uno de ellos ocupa en nuestro sistema.

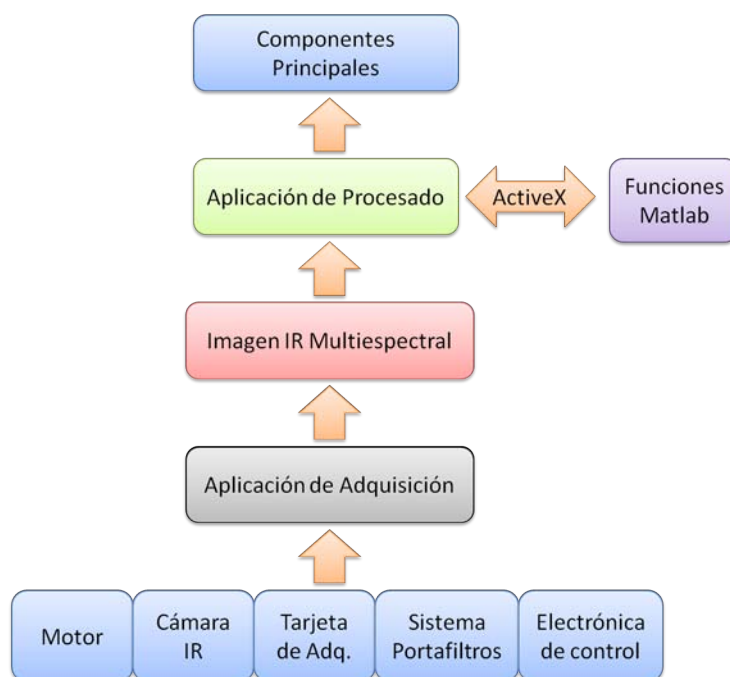
En primer lugar, y como previamente hemos mencionado, podemos separar en dos los objetivos fundamentales de nuestro proyecto:

- Por un lado, abordaremos el **control** y la **gestión de un sistema multispectral**. Para lo cual, contaremos con los siguientes elementos:
 - Un **sistema portafiltros**, que contiene una rueda sobre la que podremos colocar filtros de distintos anchos de banda y longitudes de onda, de manera que obtendremos una resolución espectral de tipo discreto asociada a cada uno de los filtros seleccionados.
 - Un **motor eléctrico**, que será el encargado de hacer girar la rueda portafiltros, y que transmitirá el movimiento hacia ésta por medio de un sistema de correas.
 - Una **cámara infrarroja**, que será la encargada de la adquisición de imágenes. De esta forma, deberemos sincronizar el movimiento de la rueda portafiltros con el instante de adquisición de la cámara.
 - Una **electrónica de control**, que jugará un papel relevante en la sincronización del sistema, ya que dicha electrónica nos devolverá una salida digital variable en función de la posición de los filtros seleccionados con respecto a la óptica de la cámara.
 - Una **tarjeta de adquisición**, cuya funcionalidad jugará un doble papel, por un lado consistirá en la entrada a nuestro software de las señales de control, y por otro aportará una inestimable ayuda a la sincronización mediante un contador de flancos.

- Finalmente, una **aplicación basada en el lenguaje de programación LabView** se encargará de interactuar y controlar todos los elementos previamente descritos, además de las tareas de interacción con el usuario y las funciones de visualización.
- Por otro lado, llevaremos a cabo un **procesado digital** valiéndonos de las imágenes obtenidas por el sistema de control y adquisición. Realizaremos dicho procesado **en tiempo real o cuasi real**, de forma que la interfaz gráfica nos permitirá visualizar los resultados del procesado paralelamente a la adquisición. De igual forma, podremos separar los elementos involucrados en:
 - Una **aplicación LabView** que será la responsable de gestionar de forma paralela ambos procesos de adquisición y procesado.
 - Una serie de **rutinas desarrolladas en el lenguaje de programación Matlab**, que se convertirán en la piedra angular del procesado digital.

Tras esta introducción tanto a la funcionalidad como a los elementos encargados de llevarla a cabo, podremos presentar en la Figura 1 una interpretación gráfica del entramado descrito en el párrafo anterior, de manera que el lector pueda comprender de una forma más práctica la interacción entre cada uno de estos elementos y su papel en el sistema global.

Figura 1: Interpretación gráfica del proyecto.



Índice general

I	INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA INFRARROJA	3
1.	Principios de la tecnología infrarroja	5
1.1.	Inicios de los dispositivos infrarrojos	5
1.2.	Fundamentos de la radiación infrarroja	7
1.2.1.	El espectro electromagnético	7
1.2.2.	Sistema de adquisición en el infrarrojo	10
2.	Fuentes de radiación	15
2.1.	Conceptos básicos de radiometría	15
2.2.	Radiación del cuerpo negro	16
3.	Óptica	21
3.1.	Parámetros importantes	21
3.2.	Arrays de plano focal	22
3.3.	Filtros interferenciales	23
4.	Detectores Infrarrojos	25
4.1.	Parámetros relevantes	25
4.2.	Tipos de detectores	27
4.3.	Detectores fotónicos	28
4.3.1.	Fotoconductores	28
4.3.2.	Fotovoltaicos	29
4.3.3.	Pozos cuánticos	30
4.4.	Detectores térmicos	31
4.4.1.	Bolómetros	31
4.4.1.1.	Microbolómetros	32
4.4.2.	Piroeléctricos	32
4.4.3.	Comparativa	33

II CONTROL Y GESTIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN	35
5. Componentes hardware empleados	37
5.1. Motor EPOS	38
5.1.1. Esquema de interconexión	38
5.1.2. Proceso de regulación	39
5.2. Cámara PV320	45
5.3. Sistema portafiltros	47
5.4. Electrónica de control	49
5.4.1. Señal de salida	51
5.5. Tarjeta de Adquisición	51
5.5.1. Esquema de conexionado	53
6. Principio de funcionamiento	55
6.1. Instantes de adquisición	55
6.2. Sistema completo	58
7. Software de control	61
7.1. Introducción a LabView	61
7.1.1. Instrumentos virtuales	62
7.1.2. Panel frontal en LabView	63
7.1.3. Diagrama de bloques	65
7.2. Gestión del sistema completo	65
7.2.1. Análisis detallado de la implementación LabView	66
7.2.2. Interfaz gráfica de la aplicación	82
III PROCESADO DIGITAL MULTIESPECTRAL	87
8. Análisis de componentes principales	89
8.1. Introducción	89
8.2. Planteamiento del problema	90
8.3. Cálculo de las componentes	91
9. Componentes principales en tiempo real	95
9.1. Introducción	95
9.2. ¿Qué componente principal seleccionar?	97
9.3. Componentes principales en LabView	97

9.3.1. Diagrama de bloques	98
9.3.2. Panel frontal	101
9.4. Componentes principales en Matlab	102
IV EXPERIMENTOS Y CONCLUSIONES	107
10.Experimentos realizados	109
10.1. Primer experimento	109
10.2. Segundo experimento	123
11.Conclusiones	131
11.1. Líneas futuras	132
11.1.1. Líneas de desarrollo	132
11.1.2. Aplicaciones futuras	133
V ANEXOS	135
Anexo I. Promediado de imágenes	137
Anexo II. Presupuesto	139
Anexo III. Esquemas electrónicos	141
Anexo IV. Planos de la rueda portafiltros	144
Nomenclatura	152
Bibliografía	153

Índice de figuras

1.	Interpretación gráfica del proyecto.	XIV
1.1.	El espectro electromagnético	8
1.2.	Transmitancia atmosférica.	10
1.3.	Resolución espectral y espacial en un sistema de adquisición. . .	11
2.1.	Curvas de emisión de un cuerpo negro.	17
2.2.	Definición de estereoradián.	19
2.3.	Superficie lambertiana.	20
3.1.	Array de plano focal.	23
3.2.	Ejemplo de filtro interferencial.	24
4.1.	Tipos de detectores.	28
4.2.	Detectores fotovoltaicos.	29
4.3.	Configuración simple para un bolómetro.	32
4.4.	Detectividad específica para varios detectores IR.	34
5.1.	Diagrama de bloques del sistema de adquisición.	37
5.2.	Esquema de interconexión del motor EPOS.	39
5.3.	Esquema de regulador PID.	40
5.4.	Regulador de corriente.	42
5.5.	Dos últimas iteraciones del regulador de velocidad.	43
5.6.	Dos últimas iteraciones del regulador de posición.	44
5.7.	Imagen de la cámara PV-320.	45
5.8.	Rueda portafiltros.	48
5.9.	Sistema de transmisión del movimiento.	49
5.10.	Electrónica de control.	50
5.11.	Tarjeta de Adquisición NI-6501.	52
5.12.	Conexión de la tarjeta NI-6501.	54

6.1. Elementos de sincronización.	56
6.2. Esquema de alineamiento.	57
6.3. Instantes de adquisición.	58
6.4. Vista frontal del sistema de adquisición multispectral.	58
6.5. Vista lateral del sistema de adquisición multispectral.	59
7.1. Ejemplos de instrumentos virtuales.	63
7.2. Elementos de un panel frontal.	64
7.3. Diagrama de flujo general.	67
7.4. Comunicación con el motor EPOS.	69
7.5. Inicialización y referencia.	70
7.6. Instrumento para movimiento absoluto.	71
7.7. Inicialización de la cámara IR.	72
7.8. Configuración de la cámara IR.	72
7.9. Configuración del módulo DAQmx.	73
7.10. Inicialización de la imagen IR.	74
7.11. Diagrama de flujo detallado.	77
7.12. Código encargado de la detección de flancos.	78
7.13. Código del bucle de adquisición.	79
7.14. Código de adquisición y salvado.	80
7.15. Reanudación del movimiento del motor.	81
7.16. Código de liberación de recursos.	81
7.17. Panel frontal del sistema de adquisición.	83
7.18. Consulta del modo de adquisición.	84
7.19. Diálogo de selección de directorio.	85
9.1. Diagrama del cálculo de componentes principales.	96
9.2. Relación entre las aplicaciones desarrolladas.	98
9.3. Ejemplo de Matlab Script en LabView.	100
9.4. Comunicación con Matlab y visualización.	100
9.5. Interfaz gráfica para dos filtros interferenciales.	102
9.6. Acondicionamiento previo de las imágenes.	104
10.1. Emitancia espectral de una llama.	110
10.2. Primer experimento.	111
10.3. Adquisición del primer experimento.	112
10.4. Análisis del primer filtro.	115
10.5. Análisis del segundo filtro.	116
10.6. Análisis de la primera componente principal.	117

10.7. Análisis de la segunda componente principal.	118
10.8. Vista en tres dimensiones de la segunda componente principal. .	119
10.9. Resultado del algoritmo k-means sobre el primer filtro.	121
10.10. Resultado del algoritmo k-means sobre el segundo filtro.	121
10.11. Resultado del algoritmo k-means sobre la primera componente. .	122
10.12. Resultado del algoritmo k-means sobre la segunda componente. .	122
10.13. Escenario correspondiente al segundo experimento.	124
10.14. Imagen correspondiente al primer filtro.	125
10.15. Imagen correspondiente al segundo filtro.	125
10.16. Imagen correspondiente a la primera componente.	126
10.17. Imagen correspondiente a la segunda componente.	126
10.18. Resultado del algoritmo k-means para el primer filtro.	127
10.19. Resultado del algoritmo k-means para el segundo filtro.	128
10.20. Resultado del algoritmo k-means para la primera componente. .	128
10.21. Resultado del algoritmo k-means para la segunda componente. .	129
11.1. Presupuesto detallado.	140
11.2. Esquema correspondiente al circuito emisor.	142
11.3. Esquema correspondiente al circuito receptor.	143
11.4. Vista en 3-D de la rueda portafiltos.	145
11.5. Soporte para los LED's.	146
11.6. Soporte para los detectores.	147
11.7. Articulación de la rueda.	148
11.8. Soporte frontal.	149
11.9. Soporte posterior.	150

Índice de cuadros

2.1. Principales unidades radiométricas.	19
5.1. Parámetros PI del regulador de corriente.	41
5.2. Parámetros PI del regulador de velocidad.	43
5.3. Parámetros PID del regulador de posición.	44
5.4. Valores de sensibilidad para la cámara PV-320.	46
10.1. Comparativa del ratio R	119

Parte I

INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA INFRARROJA

Capítulo 1

Principios de la tecnología infrarroja

1.1. Inicios de los dispositivos infrarrojos

En el día a día cotidiano nos encontramos con un gran número de formas de radiación como son la luz del Sol, el calor, las ondas de radio o los rayos X, las cuales, gracias a los avances tecnológicos, han sido empleadas en la satisfacción de todo tipo de necesidades, desde la transmisión de información hasta el diagnóstico de diversas afecciones. Dentro de este marco, la tecnología infrarroja ha jugado un importante papel en el desarrollo de numerosos campos durante los últimos años.

El descubrimiento de la radiación infrarroja fue llevado a cabo por el astrónomo germano-británico William Herschel, quién logró demostrar la existencia de este tipo de radiación en el año 1800 [1] usando un prisma para dispersar la luz del sol y un termómetro con el que registrar la temperatura para cada zona del espectro. De esta forma pudo observar, a partir de su efecto en la temperatura, una forma de luz invisible más allá del rojo.

Este trabajo significó el nacimiento de la espectroscopía infrarroja. Sin embargo, tuvieron que pasar más de 30 años para que el enorme potencial de esta forma de energía pudiera tener el reconocimiento que merecía. Desde entonces, ha habido un enorme progreso tanto en el desarrollo teórico como aplicado de las propiedades del espectro infrarrojo.

Durante el siglo XIX y la primera parte del siglo XX tuvo un papel relevante el desarrollo, y su validación, de la formulación de los fundamentos de la radiación térmica. Los ejemplos más destacados son, sin lugar a dudas, la ley

de Stefan-Boltzmann, la ley de desplazamiento de Wien y, finalmente, la teoría cuántica de Planck.

Durante la Primera Guerra Mundial, los combatientes de ambos bandos dispusieron de programas de investigación dedicados a las aplicaciones del espectro infrarrojo en el ámbito militar, así como de pequeños experimentos de comunicaciones mediante el uso de tecnología infrarroja. A modo de ejemplo, los sistemas de búsqueda implementados con tecnología infrarroja que fueron desarrollados durante este periodo eran capaces de detectar aeronaves a una distancia de 1 milla, y a una persona aproximadamente a 1000 pies [14].

El periodo de entreguerras que sucedió a continuación estuvo marcado por el desarrollo de los detectores de fotones y los conversores de imágenes debido a la necesidad de avanzar en el campo de la espectroscopía infrarroja, ya que ésta era una de las herramientas analíticas más importantes en el sector farmacéutico. Los conversores de imágenes desarrollados en vísperas de la Segunda Guerra Mundial fueron de un tremendo interés en el ámbito militar, ya que proporcionaban la capacidad de “ver a través de la oscuridad”. Esta tecnología básicamente convertía una imagen que inicialmente era creada con ondas infrarrojas en otra imagen visible al ojo humano.

Tras el estallido de la Segunda Guerra Mundial se propusieron numerosos dispositivos infrarrojos por parte de ambos bandos, pero de estos dispositivos fueron muy pocos los que realmente se comercializaron. Es de destacar que los alemanes consiguieron llevar a cabo un sistema de comunicaciones en el infrarrojo, que fue denominado “Lichtsprecher” y que fue utilizado en el desierto de África durante las grandes batallas protagonizadas por tanques entre 1941 y 1943 [14]. Este dispositivo puede ser considerado como el primer sistema de comunicaciones infrarrojo operativo, y tuvo multitud de aplicaciones durante la Segunda Guerra Mundial. Por su parte, Estados Unidos desarrolló a su vez sistemas de comunicaciones en el espectro infrarrojo integrados en buques y navíos de combate para uso naval y como simples visores.

Una vez la contienda finalizó, los sistemas infrarrojos poseyeron el suficiente interés como para que su desarrollo no se ralentizara, y se consiguieron grandes avances en detectores y sistemas ópticos, aunque, su ámbito de aplicación ha seguido estando históricamente muy ligado al entorno militar. Pese a esto, los avances llevados a cabo en este campo se extendieron con el tiempo a los demás ámbitos de la industria, la ciencia o la medicina.

1.2. Fundamentos de la radiación infrarroja

Para comenzar con un análisis más exhaustivo de esta porción del espectro electromagnético, podemos recurrir a las palabras que Herschel publicó en alusión a su reciente descubrimiento [14]:

“...There are rays coming from the sun... invested with a high power of heating bodies but with none of illuminating objects... The maximum of the heating power is vested among the invisible rays... It may be pardonable if I digress for a moment and remark that the foregoing researches ought to lead us on to others...”

Así, a lo largo de esta sección estudiaremos estos denominados como “rayos invisibles” por Herschel, englobándolos primero dentro del espectro electromagnético y describiendo posteriormente los elementos fundamentales empleados en su detección.

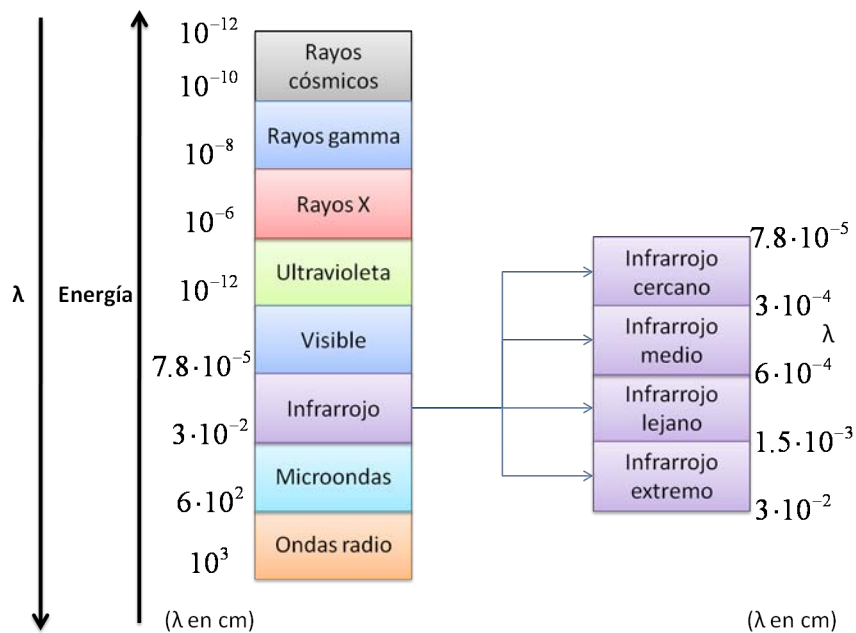
1.2.1. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético hace referencia a una colección de formas de energía radiada, desde los rayos cósmicos hasta los empleados en comunicaciones de radiofrecuencia, donde cada uno de los cuales puede ser considerado como una onda o una partícula viajando a la velocidad de la luz. Estas ondas difieren unas de otras en su longitud de onda y, por consiguiente, en su frecuencia; de esta forma podemos ver en la Figura 2.1 como al incrementar la frecuencia aumenta su energía de acuerdo a la relación de Planck:

$$E = h \cdot f \quad (1.2.1)$$

Como podemos ver en la Figura 1.1, cuando hablamos de infrarrojo nos estamos refiriendo a aquella región del espectro electromagnético entre las zonas de visible y las correspondientes a las microondas. Más concretamente, el espectro infrarrojo abarca desde, aproximadamente, 0,78 hasta 300 μm . Aunque dentro de este rango podemos diferenciar fundamentalmente cuatro regiones [12]:

Figura 1.1: El espectro electromagnético



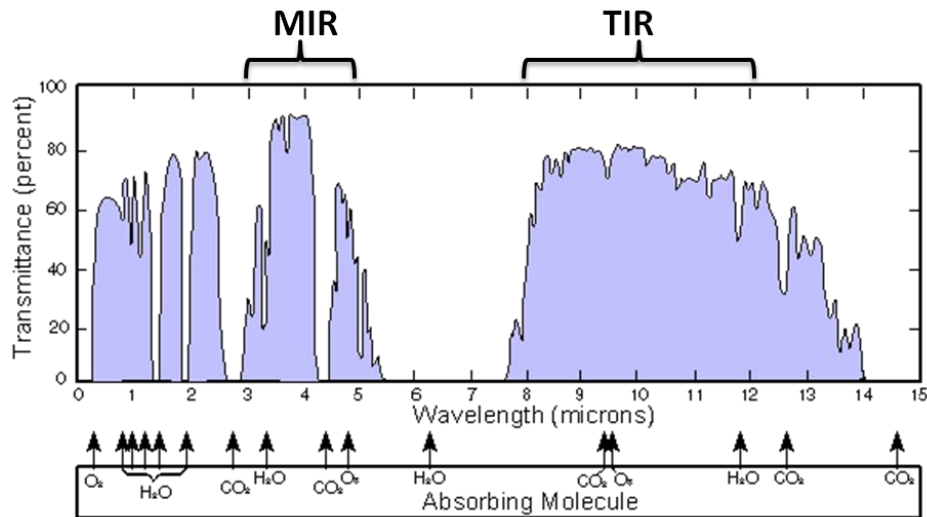
- Infrarrojo cercano (*Near InfraRed (NIR)*), que corresponde a la zona que abarca desde el inicio del espectro infrarrojo hasta longitudes de onda de $3\text{ }\mu\text{m}$. Atendiendo a su amplia utilización en sistemas de comunicaciones, podríamos igualmente distinguir dos zonas dentro del infrarrojo cercano:
 - IR-A (denominada también infrarrojo cercano sin realizar ninguna distinción), de $0,78$ hasta $1,4\text{ }\mu\text{m}$, esta región queda definida por el nivel de absorción del agua, siendo comúnmente usada en sistemas de transmisión basados en fibra óptica debido a las bajas pérdidas por atenuación que sufren los dispositivos ópticos basados en SiO_2 .
 - IR-B o SWIR (*Short-Wavelength InfraRed*), de entre $1,4$ hasta $3\text{ }\mu\text{m}$, donde la absorción debida al agua se incrementa de forma significativa. En esta región encontramos el rango desde 1530 hasta 1560 nm utilizada ampliamente en comunicaciones de larga distancia.
- Infrarrojo medio (*Medium InfraRed (MIR)*), en la zona de 3 a $6\text{ }\mu\text{m}$. En ella cobran especial importancia tanto los fenómenos debidos a la reflexión de la luz del sol como a la propia emisión de la superficie terrestre, por lo

que resulta una región problemática del espectro infrarrojo. Pese a esto, su utilización ha sido especialmente provechosa para el análisis de las soluciones diluídas, mediante espectroscopía basada en la transformada de Fourier.

- Infrarrojo lejano (*Far InfraRed (FIR)*), en la zona de 6 a 15 μm . En esta región podemos encontrar aplicaciones de todo tipo, desde sistemas de detección de peatones hasta complejos osciladores de Terahercios usados en astronomía.
- Infrarrojo extremo (*Extreme InfraRed (XIR)*), para el resto del ancho espectral.

La clasificación anterior está orientada a las aplicaciones que tienen lugar en cada una de las bandas. Sin embargo, en aplicaciones de teledetección, las características de transmitancia de los gases que componen la atmósfera nos delimitarán regiones del espectro conocidas como ventanas de transmisión [1]. De esta forma, identificaremos como infrarrojo medio o MIR al rango que abarca desde 3 a 5 μm , y denominaremos infrarrojo térmico (*Thermal InfraRed (TIR)*) a la región entre 8 y 12 μm . En la Figura 1.2 [14] se representa la transmitancia medida en dirección vertical a lo largo de toda la atmósfera frente a la longitud de onda, en ella podemos ver como para las zonas MIR y TIR se encuentran los valores más altos, lo que reduce las pérdidas por transmisión favoreciendo así la detección.

Figura 1.2: Transmitancia atmosférica.



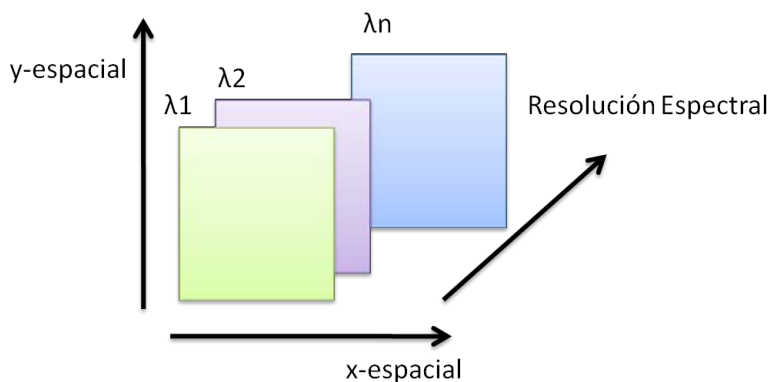
1.2.2. Sistema de adquisición en el infrarrojo

En esta sección describiremos de forma cualitativa los elementos que conforman un sistema de adquisición de radiación infrarroja común. Para ello, partiremos de un esquema compuesto por una fuente de emisión infrarroja, el medio o canal por el cual se propagará y, finalmente, un dispositivo sensor que será el objeto de nuestra descripción.

Dicho dispositivo estará a su vez formado por varios elementos que, debidamente interconectados, permiten conformar una imagen bidimensional con una cierta resolución espacial y/o espectral, en la que cada uno de los puntos que la integran estará caracterizado por un cierto valor de nivel digital (ND).

De esta forma, y como podemos ver en la Figura 1.3 el valor digital obtenido corresponde a un conjunto de coordenadas espaciales x e y para una longitud de onda dada. En la misma figura podemos ver un conjunto discreto de longitudes de onda, lo que origina una resolución espectral de carácter también discreto. Esta característica será compartida por nuestro sistema de selección multispectral, como se comentará más adelante.

Figura 1.3: Resolución espectral y espacial en un sistema de adquisición.



Tradicionalmente, se ha utilizado el término de *sistemas de imagen* cuando nos referíamos a aquellos dispositivos que únicamente nos proporcionaban resolución espacial, para diferenciarlos así de aquellos que nos proporcionan sólo resolución espectral, denominados *sistemas espectrorradiométricos*. Pese a esta distinción, podemos encontrar sistemas que aúnen ambas resoluciones, espectral y espacial, en un único instrumento denominado *espectrómetro de imagen*. En esta clasificación se encuentran los *sistemas multispectrales* que utilizan un número no muy elevado de bandas del espectro infrarrojo y donde podremos englobar el esquema de adquisición desarrollado en este proyecto. Con el fin de obtener una mayor resolución espectral a lo largo de un mayor número de bandas, nacieron los *sistemas ultraespectrales* (consiguiendo resoluciones de $0,1\mu m$) e *hiperespectrales* (con resoluciones de en torno a $0,01\mu m$ y cientos de bandas) [1].

En nuestro caso, el proceso de adquisición será llevado a cabo por una cámara de infrarrojos, que nos conferirá de forma directa resolución espacial. Sin embargo, tendremos que recurrir a una serie de elementos adicionales para poder proveer de resolución espectral a nuestro sistema, lo que consistirá el objeto de estudio de nuestro proyecto.

A continuación, describiremos los elementos de los que comúnmente consta un sistema de adquisición para una sola banda:

- *Óptica*. Consiste en el elemento o sistema encargado de concentrar la radiación incidente en el detector. Así pues, junto a este último establecerá la resolución espacial de nuestro sistema.

- *Detector*. Este elemento constituye la parte fundamental de todos los sistemas de adquisición, ya que será el encargado de convertir la radiación electromagnética incidente en una magnitud electrónica que podremos medir y procesar. Existen diversos tipos de detectores y serán analizados con mayor detalle en el capítulo 4.
- *Electrónica de acondicionamiento*. Será la encargada de amplificar y acondicionar la magnitud medida por el detector (habitualmente corriente). Dicha amplificación supone un aumento de la sensibilidad de nuestro sistema, por lo que se podrán mejorar de forma sustancial sus prestaciones. Aparte de esto, el acondicionamiento de señal llevado a cabo nos permite realizar muchas más operaciones que una simple mejora en la sensibilidad. Podremos realizar tareas como:
 - Eliminación de fuentes de error constantes y de carácter aditivo mediante variaciones de los niveles de offset del circuito acondicionador.
 - Disminución de la potencia de ruido mediante la utilización de filtrado electrónico paso banda o paso bajo. Este filtrado tiene como objetivo disminuir el ancho de banda equivalente de ruido, disminuyendo así su potencia.
 - Variación del ancho de banda de trabajo o del tiempo de respuesta del circuito electrónico, ya que suele ser el elemento limitante.
- *Conversión A/D*. Para su posterior procesado y manipulación deberemos convertir la magnitud medida a un esquema digital, para ello son varias las opciones de las que se dispone: conversores flash, de aproximaciones sucesivas, sigma-delta, doble rampa...
- *Funciones de procesado y visualización*. Dentro de este apartado podremos distinguir los siguientes elementos [1]:
 - *Control automático de ganancia* o AGC (*Automatic Gain Control*), encargado de variar los parámetros globales de ganancia y offset. Con este ajuste mejoraremos el contraste de la imagen pero, al ser automático, perderemos la información de tipo radiométrico. Habitualmente se emplea sólo en la región central de la imagen, denominada ROI (*Region Of Interest*).

- Cuando el detector está formado en realidad por un conjunto de detectores, puede ser necesario un ajuste de uniformización para cada uno de los detectores empleados. Para ello se utiliza una *tabla de corrección de no uniformidades o NUC*, donde se especifican valores de ganancia y offset para cada detector y tiempo de integración.
- Paleta de niveles de gris o falso color empleada antes de codificar la imagen, para esto se utiliza una LUT (*Look-Up table*).
- *Codificador de video* con el fin de obtener una señal compatible con los estándares de video habituales (PAL, NTSC,...).
- Diferentes técnicas de procesado como el uso de filtros digitales o técnicas de tratamiento estadístico de imágenes.

Capítulo 2

Fuentes de radiación

Una vez descritos los principales elementos de un sistema de adquisición, en este capítulo abordaremos la caracterización de las fuentes de radiación que, precisamente, son el objeto de nuestra medida. Por lo tanto, comenzaremos con una pequeña introducción a los conceptos más básicos de radiometría, para después continuar con una descripción de las leyes fundamentales que gobiernan la radiación de energía infrarroja.

2.1. Conceptos básicos de radiometría

En la superficie de un objeto pueden tener lugar cuatro fenómenos diferentes, los cuales quedan caracterizados por las siguientes magnitudes: transmitancia (τ), reflectancia (ρ), absortancia (α) y emisividad (ε). Los tres primeros son definidos por las relaciones que guardan con la energía incidente, transmitida, reflejada y absorbida respectivamente. La ley de conservación de la energía nos lleva a escribir la siguiente relación en función de la longitud de onda [4]:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (2.1.1)$$

Sin embargo, la mayoría de los materiales que dejan pasar la radiación en las banda electro-óptica se comportan como cuerpos opacos ($\tau(\lambda) = 0$) para las frecuencias del infrarrojo, lo que reduce la anterior expresión a [4]:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (2.1.2)$$

Cuando trabajamos en longitudes de onda correspondientes al espectro electro-óptico, la luz proveniente de fuentes externas (Sol, estrellas, fuentes ar-

tificiales,...) ilumina al objeto que intentamos caracterizar, pero esta radiación es reflejada en su mayor medida. En el infrarrojo, el propio objeto es el que provee la mayor parte de la radiación al sensor siempre y cuando la reflectividad sea baja.

2.2. Radiación del cuerpo negro

Todos los cuerpos con una temperatura mayor que el cero absoluto (0 K) emiten ondas electromagnéticas. Este efecto se debe a las vibraciones en las moléculas producidas por el calor, lo que conlleva vibraciones en los electrones. Estas vibraciones de carácter eléctrico crean ondas electromagnéticas que se propagarán en el espacio en mayor o menor medida dependiendo del grado de acoplamiento electromagnético alcanzado, que establecerá la transferencia de energía. De esta forma, la cantidad de energía radiada dependerá fundamentalmente de la temperatura a la que se encuentre el cuerpo y de las características de su superficie en cuanto a emisividad, concepto que será introducido más adelante.

Se denomina **radiación de cuerpo negro** a la emitida por un objeto que absorbe toda la radiación incidente ($\alpha = 1$), destacando las siguientes características:

- Una mayor temperatura en el cuerpo se corresponde con una mayor cantidad de radiación emitida.
- La distribución espectral de la radiación tiende a concentrarse hacia frecuencias menores a medida que la temperatura del cuerpo aumenta.

Podremos describir la radiación del cuerpo negro a través de la denominada *ecuación de Planck del cuerpo negro*, que especifica que la emitancia espectral es[4]:

$$M(\lambda, T)_{CN} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad [W/cm^2 \cdot \mu m] \quad (2.2.1)$$

donde:

- λ representa la longitud de onda en μm .
- T es la temperatura absoluta del cuerpo.
- $c_1 = 3,7418 \times 10^4 W \cdot \mu m^4/cm^2$.
- $c_2 = 1,4388 \times 10^4 \mu m \cdot K$.

Concepto de emisividad y leyes fundamentales

Sin embargo, no todas las fuentes de radiación pueden ser consideradas como cuerpos negros, por lo que necesitamos de una generalización de la ecuación de Plank que podamos aplicar al resto de fuentes. Para ello, introduciremos el concepto de emisividad (ε) definiendo la emitancia espectral de la siguiente forma [4]:

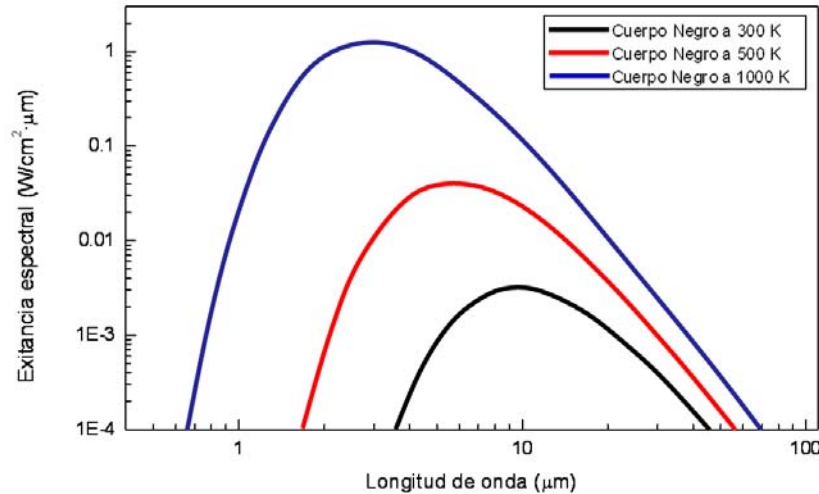
$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad [W/cm^2 \cdot \mu m] \quad (2.2.2)$$

donde las constantes c_1 y c_2 toman los mismos valores que en la expresión anterior. Utilizando las dos ecuaciones anteriores, la emisividad de un objeto queda definida como el cociente entre la emitancia espectral del cuerpo negro y la correspondiente al propio objeto:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{M(\lambda, T)_{CN}}{M(\lambda, T)} \Rightarrow 0 \leq \varepsilon(\lambda) \leq 1 \quad (2.2.3)$$

donde una emisividad constante e igual a 1 ($\varepsilon(\lambda) = 1 \forall \lambda$) nos indica un radiador de cuerpo negro perfecto.

Figura 2.1: Curvas de emisión de un cuerpo negro.



En la Figura 2.1 podemos ver la radiación de un cuerpo negro a varias temperaturas, pudiendo apreciar un desplazamiento de la emitancia hacia longitudes de onda menores con el incremento de la temperatura. La longitud de

onda en la que observamos el pico de emisión viene dada por la ley de Wien [4]:

$$\lambda_{pico} = \frac{2897,8}{T} \quad [\mu m] \quad (2.2.4)$$

siendo T la temperatura absoluta del objeto. Si éste presenta una emisividad menor que la unidad y constante con la longitud de onda ($\varepsilon(\lambda) < 1 \forall \lambda$), le denominaremos *cuerpo gris*, mientras que si un objeto presenta una emisividad dependiente de la longitud de onda será denominado *cuerpo selectivo*. Tanto los cuerpos negros como los cuerpos grises presentan una interesante propiedad llamada ley de Stefan-Boltzmann. Dicha ley nos permite expresar la emitancia total para todo el espectro de la siguiente forma:

$$M(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad [W/cm^2] \quad (2.2.5)$$

donde σ representa la llamada constante de Stefan-Boltzmann, de valor $5,67 \times 10^{-12} W/(cm^2 \cdot K^4)$.

Ley de Kirchhoff

Una vez introducido el concepto de emisividad, la ley de Kirchhoff de la radiación térmica nos indica que si nuestro objeto se encuentra en equilibrio térmico (donde no ganará ni perderá calor) la absortancia y la emisividad serán iguales:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (2.2.6)$$

Y usando las expresiones anteriores obtendremos:

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (2.2.7)$$

De modo que en el infrarrojo un cuerpo con una alta emisividad tendrá a su vez una baja reflectividad.

Magnitudes radiométricas

Además de la emitancia, mencionada hasta ahora, conviene tener claras las magnitudes radiométricas más empleadas, que se exponen en la siguiente Tabla 2.1 [4] acompañadas de su definición matemática:

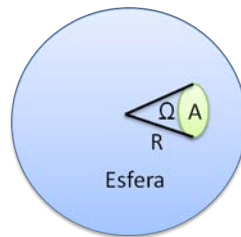
Cuadro 2.1: Principales unidades radiométricas.

Símbolo	Magnitud	Definición	Unidades
Q	Energía	<i>Fundamental</i>	Julio (J)
Φ	Flujo (Potencia)	$\frac{\partial Q}{\partial t}$	$J/s = \text{Wattios}$
I	Intensidad	$\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial \Omega} = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}$	W/sr
M	Exitancia o Emitancia	$\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial A} = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	W/cm^2
E	Irradiancia	$\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial A} = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$	W/cm^2
L	Radiancia	$\frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial A \partial \Omega} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \partial \Omega} = \frac{\partial I}{\partial A}$	$W/(cm^2 \cdot sr)$

En la tabla anterior, el símbolo A hace referencia a la superficie curva sobre la esfera de la Figura 2.2, y que está relacionada con la definición de estereoradián a través de la siguiente expresión:

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (2.2.8)$$

Figura 2.2: Definición de estereoradián.

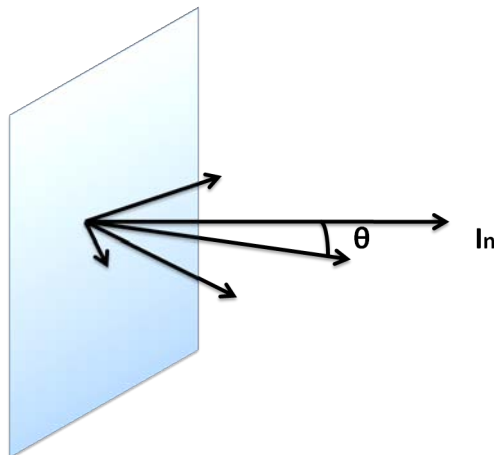


Fuentes lambertianas

Por último, cabe destacar que los cuerpos negros y grises así como la mayoría de los cuerpos selectivos pueden ser considerados como fuentes lambertianas, es decir, fuentes en las que se produce una disminución de la intensidad con el ángulo respecto a la incidencia normal en la que obtenemos el valor máximo (Figura 2.3), como indica la siguiente expresión:

$$I_{\theta} = I_n \cdot \cos \theta \quad [W/sr] \quad (2.2.9)$$

Figura 2.3: Superficie lambertiana.



El comportamiento de la mayoría de superficies creadas por el hombre puede ser considerado como lambertiano. Así, podemos considerar la mayor parte de pinturas, telas o maderas sin barnizar como superficies lambertianas. Sin embargo, todas aquellas superficies que contengan brillos o materiales excesivamente reflejantes no podrán ser incluidas dentro de esta clasificación [5].

Una superficie lambertiana tiene radiancia independiente del ángulo de emisión, lo que nos permite expresar su radiancia de forma proporcional a su emitancia [1]:

$$L = \frac{M}{\pi} \quad [W / (cm^2 \cdot sr)] \quad (2.2.10)$$

Capítulo 3

Óptica

El primer elemento que la radiación incidente encontrará en nuestro esquema de adquisición será el sistema óptico. Así pues, será el encargado de recoger la radiación IR incidente y podrá estar formado por una o varias lentes, dependiendo su complejidad del tipo de detector utilizado.

En primer lugar, comenzaremos describiendo los parámetros más importantes de un sistema óptico simple, para después pasar a describir la tecnología FPA (*Focal Plane Array*), que es la utilizada por nuestra cámara IR en particular. Por último, presentaremos los filtros interferenciales como mecanismo empleado para conseguir los requerimientos de selección espectral.

3.1. Parámetros importantes

El caso más simple de sistema óptico que podemos encontrar viene dado por una sola lente, cuyos parámetros fundamentales pueden enunciarse de la siguiente manera [1]:

- *Pupila de entrada* (D_{pe}). Es el elemento que limita la extensión del haz de rayos que, partiendo del objeto, atraviesa la lente. Podemos caracterizarlo a través de su diámetro D_{pe} .
- *Distancia focal* (f). Se trata de aquella distancia que comprende desde el centro de la lente hasta el punto en el que convergen los rayos paralelos al eje óptico de la lente.
- *Número f* ($F\#$). También es denominado apertura de diafragma, y se corresponde con la relación entre la distancia focal y el diámetro de la

pupila de entrada:

$$F\# = \frac{f}{D_{pe}} \quad (3.1.1)$$

De forma que un valor pequeño del número F nos indica la entrada de una gran cantidad de flujo radiante en nuestro sistema.

- *Campo de visión instantáneo o IFOV (Instantaneous Field Of View)*. Se define como el ángulo sólido por el que la radiación es detectada por cada uno de los detectores del sistema en un instante determinado. Esta definición es especialmente útil cuando nuestro detector consta a su vez de un conjunto de detectores que son barridos a lo largo del tiempo. Suele ser expresado en radianes de la siguiente forma:

$$IFOV = \frac{l}{f} \quad (3.1.2)$$

donde l es el tamaño del detector si suponemos éste cuadrado.

- *Campo de visión o FOV (Field of View)*. De acuerdo a la anterior definición, este parámetro consistirá en el campo de visión para un array de detectores completo, y por lo tanto será independiente del instante de tiempo en el que nos encontremos. Viene dado por la siguiente expresión:

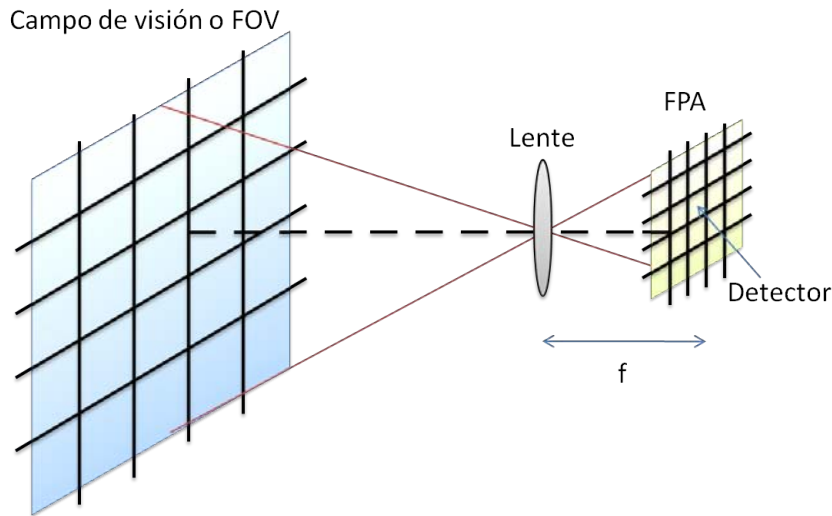
$$FOV = IFOV \cdot n \quad (3.1.3)$$

donde n hace referencia al tamaño del array de detectores para cada una de las dimensiones del array.

3.2. Arrays de plano focal

Los arrays de plano focal o FPA consisten en una matriz (generalmente rectangular) de detectores situado en el plano definido por la distancia focal de la lente utilizada. Esta tecnología, en contraposición a los convencionales sistemas de barrido, no necesita de partes móviles para llevar a cabo la adquisición a lo largo de todo el campo de visión. Podemos ver un ejemplo de FPA en la Figura 3.1.

Figura 3.1: Array de plano focal.



En algunos casos, el área de los detectores del array no alcanza a rellenar por completo el tamaño de celda que les has asignado. Por esto un parámetro importante en este tipo de dispositivos es el denominado factor de relleno o *fill factor*, definido por la siguiente expresión [6]:

$$\text{Factor de relleno} = \frac{A_{\text{Detector}}}{A_{\text{Celda}}} \quad (3.2.1)$$

3.3. Filtros interferenciales

Debido a las características multispectrales de nuestro sistema de adquisición, precisaremos de un elemento adicional que nos confiera la capacidad de seleccionar las bandas del espectro que deseemos. Esto es, necesitamos un elemento cuya respuesta espectral posea una característica de filtro paso banda, de forma que podamos escoger tanto su ancho espectral como la zona del espectro en la que se encuentre centrado.

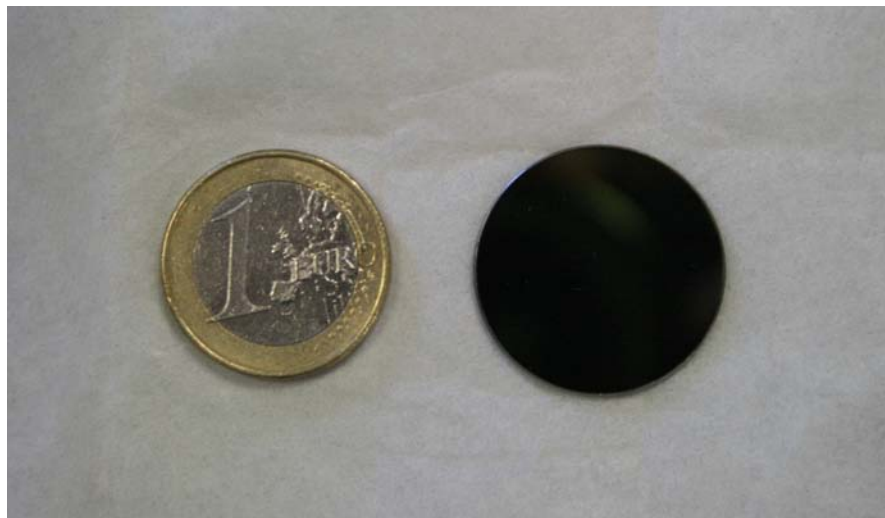
Así pues, emplearemos filtros ópticos que sólo permitan el paso de la radiación que cumpla ciertas propiedades espectrales, atenuando o suprimiendo la radiación restante. Los instrumentos ópticos más indicados para esta labor son los denominados filtros interferenciales.

Dichos filtros emplean el fenómeno de interferencia de la luz para limitar las longitudes de onda que lo atraviesan. Consisten de diversas capas muy finas

de materiales con índices de refracción relativamente altos y bajos. La luz que incide sobre ellos es al mismo tiempo reflejada y transmitida, de forma que interfiera con ella misma. Aprovechando este comportamiento y mediante la variación de los grosores de las capas que lo conforman se puede seleccionar el rango de longitudes de onda capaces de atravesar el filtro [15].

En la Figura 3.2 podemos ver uno de los filtros interferenciales de los que disponemos en el laboratorio (de una pulgada de tamaño), que serán los empleados posteriormente en nuestro sistema multiespectral.

Figura 3.2: Ejemplo de filtro interferencial.



Capítulo 4

Detectores Infrarrojos

Como ya hemos comentado, el detector será una pieza fundamental de nuestro sistema. Éste será el encargado de transformar la radiación incidente en magnitudes electrónicas que podamos procesar posteriormente. El tipo de detector y el material empleado en su fabricación condicionarán en gran medida las características del sistema completo. Debemos basar nuestra elección de acuerdo a las especificaciones de ancho de banda, resolución o coste del sistema de adquisición final.

4.1. Parámetros relevantes

Primeramente, sería conveniente presentar aquellas características que nos permiten cuantificar la calidad de un detector [1]:

- *Responsividad*. Habitualmente se define como el cociente entre la señal de salida eléctrica (comúnmente voltaje) frente a la potencia asociada a la radiación incidente a la que es sometido. Para detectores infrarrojos su expresión resulta:

$$R = \frac{\text{Señal de salida}}{\text{Radiación IR}} \quad [V/W] \quad (4.1.1)$$

Es importante diferenciar esta definición de la empleada en el ámbito opto-electrónico, en la que los detectores (fotodiodos, APD's,...) son caracterizados por la relación con su corriente de salida, sin tener en cuenta el acondicionamiento externo, por lo que resulta una responsividad expresada en la forma A/W.

- *Eficiencia cuántica*. Sólo es aplicable al caso de fotodetectores, y mide la eficiencia del detector en el sentido de electrones generados frente a fotones incidentes.
- *Ruido*. En este caso, con ruido nos referiremos al resto de señales eléctricas de procedencia distinta a la que realmente estamos interesados en sensar. Esta definición engloba tanto aquellas fuentes de ruido que podríamos evitar mediante una mejora del diseño (interferencias eléctricas, fluctuaciones de temperatura,...) como aquellas inherentes a nuestro sistema de detección (ruido térmico, de tipo flicker, de tipo impulsivo o *shot*, de oscuridad,...).
- *Relación Señal a Ruido o SNR (Signal to Noise Ratio)*. Es la relación entre la señal eléctrica que queremos medir, que representa información para nuestro sistema, y el resto de señales en las que no estamos interesados y son catalogadas como ruido.

$$SNR = \frac{Señal_{rms}}{Ruido_{rms}} \quad (4.1.2)$$

- *Potencia de ruido equivalente o NEP (Noise Equivalent Power)*. Se define como la potencia incidente necesaria para obtener una relación señal a ruido igual a 1 en el detector. Dicha potencia delimita la resolución del detector debida al ruido, ya que para potencias menores la señal no podría ser correctamente distinguida. Se expresa como:

$$NEP = \frac{Ruido_{rms}}{Responsividad} \quad (4.1.3)$$

- *Diferencia de temperatura equivalente de ruido o Noise Equivalent Temperature Difference (NETD)*. Hace referencia al cambio de temperatura del objeto con el que la variación de señal medida en nivel rms es equivalente al ruido del sistema completo. Por lo que se relaciona con la NEP mediante la variación de temperatura con respecto a la potencia incidente:

$$NETD = \frac{NEP}{\frac{dP_{inc}}{dT}} \quad (4.1.4)$$

- *Detectividad específica o D^** . Puesto que la NEP depende (a través del ruido rms) tanto del ancho de banda como del área del detector, sería útil definir un parámetro independiente de dichos factores que nos sirva para

la comparación de detectores. Por ello la detectividad específica se define como la inversa de la NEP normalizada al área del detector y al ancho de banda. Puesto que el ruido rms es proporcional a las raíces cuadradas de tanto el área del detector como del ancho de banda, la expresión resultante es:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D} \cdot \sqrt{\Delta f}}{NEP} \quad (4.1.5)$$

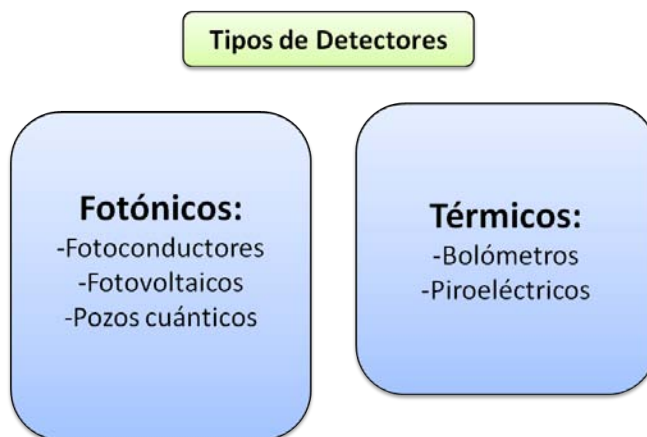
Se utiliza la inversa de la NEP modo que mayores valores de D^* se correspondan con mejores detectores.

- *Rango dinámico.* Se define como el ratio entre las señales de menor y mayor orden que pueden estar presentes en el detector en un mismo instante de tiempo.
- *Tiempo de respuesta.* Habitualmente se define como el tiempo necesario empleado por el detector para alcanzar el 96 % del valor final de su respuesta. Este tiempo podrá ser modelado en función de las características dinámicas de nuestro sistema. Por ejemplo, podremos tener sistemas con características paso bajo o paso banda, y éstos podrán ser de primer o segundo orden o incluso de órdenes mayores.

4.2. Tipos de detectores

Podremos optar por clasificar los detectores en función de si estos precisan o no de refrigeración o en en función de la tecnología empleada. Según este último criterio, y como podemos ver en la Figura 4.1, clasificaremos los detectores en térmicos y fotónicos, pudiendo diferenciar distintos subtipos dentro de cada tipo [5].

Figura 4.1: Tipos de detectores.



4.3. Detectores fotónicos

Este tipo de detectores basa su funcionamiento en la generación de portadores libres de carga empleando la energía de los fotones absorbidos. Dicha energía estará relacionada con la frecuencia de cada fotón según la expresión ya comentada $E = h \cdot f$, y el número de portadores generado dependerá de la energía de transición¹ del material seleccionado. En este punto podremos diferenciar a su vez los detectores extrínsecos, que introducen impurezas para reducir el ancho de gap, y los intrínsecos que emplean materiales sin impurezas[5].

Para los detectores fotónicos es muy importante la refrigeración, ya que el aumento de temperaturas hace que se incremente el ruido debido a la corriente de oscuridad generada en ausencia de radiación.

Dentro de los detectores fotónicos, y limitándonos a aquellos de estado sólido, podemos diferenciar entre: fotoconductores, fotovoltaicos y pozos cuánticos. A continuación describiremos cada uno de ellos.

4.3.1. Fotoconductores

Los fotoconductores basan su funcionamiento en medir cambios en la resistencia del material frente a la llegada de potencia incidente. Cuando los

¹Haciendo alusión al término en inglés *bandgap* que hace referencia a la diferencia energética entre los electrones con más energía de la banda de valencia y los de menos energía de la banda de conducción.

fotones incidentes tienen una energía mayor que la del gap, generan pares electrón-hueco al ser absorbidos, aumentando por tanto la conductividad del material debido al incremento en el número de portadoras.

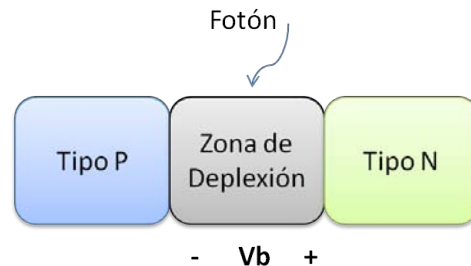
Este tipo de detectores requiere de polarización mediante un voltaje externo y se mide generalmente el voltaje generado en una resistencia en serie con la resistencia del detector.

Por último, la respuesta del fotoconductor no será plana espectralmente sino que no detectará aquellos fotones que incidan con energía menor que la del gap, y además disminuirá suavemente para energías mayores.

4.3.2. Fotovoltaicos

Los detectores fotovoltaicos, también llamados fotodiodos, se construyen a partir de una unión P-N en un material semiconductor. Dicha unión P-N posee ya un voltaje inherente, por lo que no requiere de un voltaje, o corriente, de polarización externa. En la Figura 4.2 podemos ver un diagrama correspondiente a esta configuración, en la que los fotones son absorbidos en la unión entre los materiales de tipo P y N, llamada zona de deplexión [5].

Figura 4.2: Detectores fotovoltaicos.



Esta unión es la misma que podemos encontrar en un simple diodo, con la salvedad de que el voltaje es generado en este caso mediante iluminación y viene dado por la siguiente expresión [5]:

$$V_b = \frac{k \cdot T}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad [V] \quad (4.3.1)$$

donde:

- k es la constante de Boltzmann, de valor $1,38 \times 10^{-23} J/^{\circ}K$.

- T es la temperatura de la unión.
- q es la carga del electrón.
- n_n es la densidad de electrones libres en el material de tipo N.
- n_p es la densidad de electrones libres en el material de tipo P.

La llegada de fotones provocará cambios en las poblaciones de electrones y huecos. Consultando [5] podemos encontrar el desarrollo matemático por el que la incidencia de un fotón provoca la siguiente diferencia de voltaje:

$$\frac{dV_b}{dE_f} \simeq \frac{k \cdot T \cdot \eta_q \cdot t_n \cdot (n_n + n_p)}{q \cdot d \cdot n_n \cdot n_p} \quad (4.3.2)$$

donde d es la profundidad del detector, y t_n es el tiempo de vida del portador. La anterior expresión nos permite relacionar el fotovoltaje inducido con la radiancia incidente.

Los detectores de tipo fotovoltaico nos ofrecen algunas ventajas sobre los fotoconductores, especialmente si en cuanto a responsividad y relación señal a ruido (SNR) nos referimos [4].

4.3.3. Pozos cuánticos

A diferencia de otros detectores fotónicos en los que las transiciones tienen lugar entre diferentes bandas, en este tipo de detectores las transiciones se ocasionan entre sub-bandas encontradas dentro de una misma banda (la de conducción o la de valencia). Es decir, las transiciones se originan entre los distintos niveles energéticos ocasionados al apilar diferentes espesores de materiales semiconductores, cada uno de ellos con una energía de *gap* determinada [2].

Es de destacar que a pesar de ser dispositivos relativamente recientes, han sufrido un importante desarrollo en los últimos años. Como ejemplo de su vertiginosa puesta en marcha desde sus orígenes, cabe destacar que apenas cuatro años después del primer detector se consiguió obtener una imagen infrarroja a partir de estos dispositivos [2].

Uno de los motivos de su rápido desarrollo se debe a que, al realizarse las transiciones entre sub-bandas, se requiere una menor energía incidente, lo que nos permite detectar radiación a longitudes de onda mayores. Además, dado que en este caso la diferencia energética depende del espesor del pozo, pueden

realizarse diseños “a medida” que satisfagan determinadas características espectrales.

4.4. Detectores térmicos

Los detectores térmicos absorben la energía radiada que incide sobre ellos, lo que provoca cambios en su temperatura. Estos cambios de temperatura pueden dar lugar a señales electrónicas susceptibles de un acondicionamiento posterior.

Una de las características que hacen más atractivos a este tipo de detectores es que presentan la misma respuesta para todas las longitudes de onda, en contraste con los detectores fotónicos, en los que la energía incidente asociada a cada fotón deber ser mayor que la energía del gap. Además, deberemos de tener en cuenta que este tipo de detectores no precisa de refrigeración.

En contrapartida, sus tiempos de respuesta habituales se encuentran en el orden de milisegundos, por lo que son relativamente lentos, a lo que tendremos que añadir que su detectividad se encuentra uno o dos órdenes de magnitud por debajo de los valores obtenidos en los detectores fotónicos [5].

Dentro de los detectores térmicos podemos destacar los bolómetros y aquellos denominados como piroeléctricos.

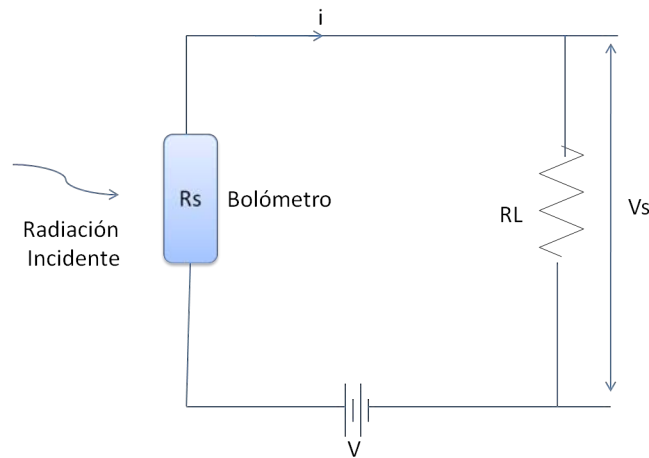
4.4.1. Bolómetros

Un bolómetro es un instrumento que mide la cantidad total de radiación electromagnética a través de los cambios que se originan en la resistencia del material detector. Dichos cambios pueden ser expresados en función del incremento de temperatura, como podemos ver en la siguiente expresión [5]:

$$\Delta R_b = R_o \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (4.4.1)$$

siendo α el factor de dependencia de R con el incremento de temperatura. En la Figura 4.3 [5] podemos ver una esquema de detección simple usando este tipo de detectores:

Figura 4.3: Configuración simple para un bolómetro.



4.4.1.1. Microbolómetros

Un microbolómetro es un tipo de bolómetro empleado habitualmente como detector para termografía. Básicamente, consta de una rejilla generalmente de óxido del vanadio. La radiación infrarroja incidente dentro de una banda especificada de longitudes de onda calienta el óxido del vanadio y cambia su resistencia eléctrica. Este cambio puede ser transducido a una magnitud electrónica y posteriormente acondicionado. La rejilla del microbolómetro se encuentra comúnmente en dos tamaños, un array de 320×240 o de 160×120 , menos costoso que el anterior [6]. Ambos tamaños proveen de la misma resolución, aunque el array mayor es el que proporciona un campo visual más ancho.

4.4.2. Piroeléctricos

Se trata de detectores relativamente nuevos que pueden ser fabricados de forma compacta. Son muy robustos y con ellos puede obtenerse tiempos de medida relativamente cortos. Su principio de funcionamiento se basa en un efecto que se manifiesta sobre materiales ferroeléctricos, según el cual la polarización en este tipo de materiales disminuye al aumentar la temperatura, hasta una temperatura denominada de Curie por encima de la cual la polarización es cero [5]. Si el ferroeléctrico se calienta, varía la polarización y por tanto la carga. Esta variación de carga ocasiona una intensidad eléctrica susceptible de ser

medida. De aquí se desprende una característica fundamental de los detectores piroeléctricos, y es que sólo son capaces de medir variaciones de temperatura.

La cámara infrarroja que formará parte de nuestro sistema multispectral empleará una matriz de este tipo de detectores, por lo que el diseño incluye un *chopper*² encargado de modular la radiación incidente en el detector, convirtiéndola así en una señal variable.

Sus tiempos de respuesta son del orden de milisegundos y se utilizan sobre todo en sensores de presencia o de fuego.

4.4.3. Comparativa

En la Figura 4.4 [16] podemos ver una gráfica comparativa con los valores de detectividad específica frente a la longitud de onda para diferentes tipos de detectores, materiales y temperaturas.

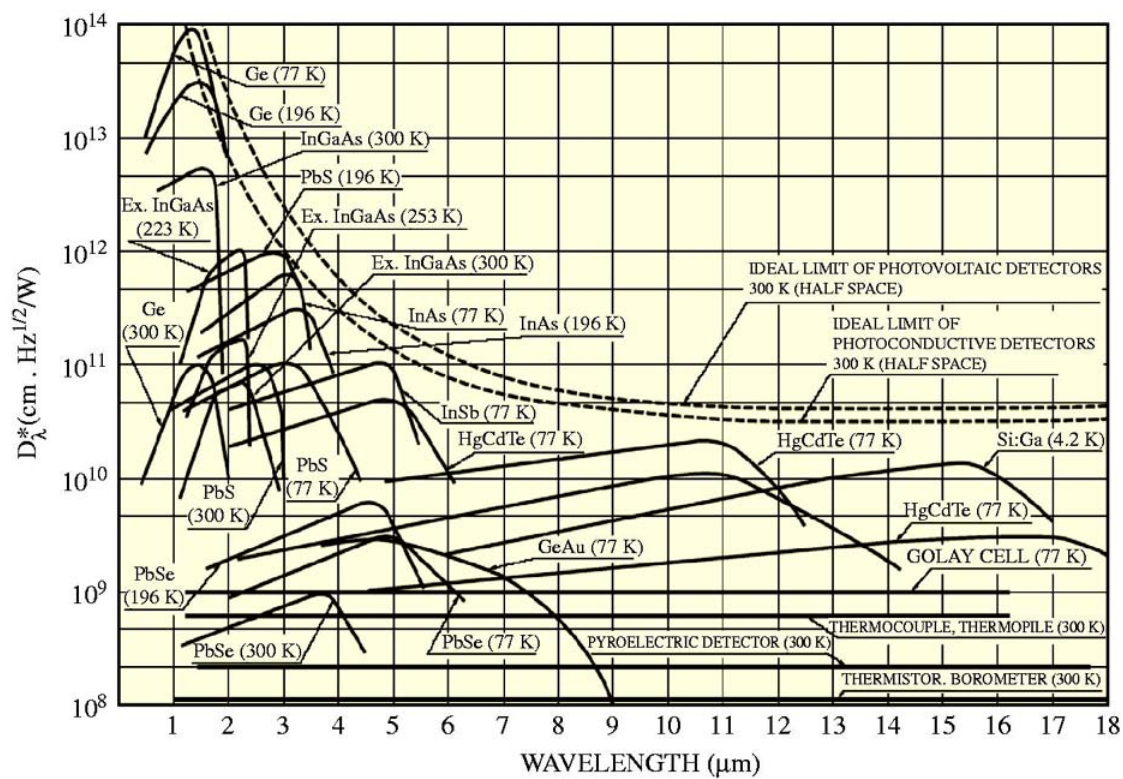
La primera característica destacable de la gráfica es que la detectividad de los detectores cuánticos es varios órdenes de magnitud superior a la de los térmicos. En cambio, los detectores térmicos obtienen mejores características de ancho de banda, con una respuesta prácticamente plana.

Las limitaciones en cuanto al ancho de banda de los detectores fotónicos son debidas a dos motivos principalmente:

- La longitud de onda de corte superior es debida a que la radiación incidente ha de superar la energía del gap del detector, y ya que $E_f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, a medida que aumentamos la longitud de onda la energía de cada fotón disminuye, lo que explica la caída tan abrupta en la gráfica.
- El motivo de que la detectividad también disminuya conforme disminuimos la longitud de onda es debido principalmente a que se expresa en unidades de V/W , al disminuir λ para un mismo número de fotones la potencia incidente aumenta (W) y por lo tanto la detectividad disminuye ya que el voltaje sólo depende del número de fotones y no de su energía.

²Un chopper es un dispositivo mecánico que interrumpe de forma periódica la radiación incidente a cada detector.

Figura 4.4: Detectividad específica para varios detectores IR.



Parte II

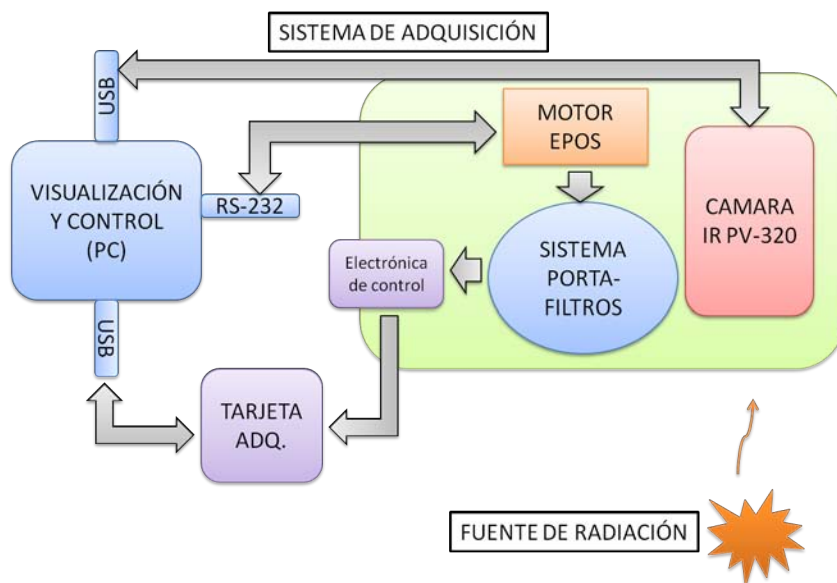
CONTROL Y GESTIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Capítulo 5

Componentes hardware empleados

En este capítulo analizaremos cada uno de los elementos que componen nuestro sistema de adquisición. Los elementos hardware más relevantes para nuestro análisis serán aquellos que ya enunciamos en la visión general del proyecto, y pueden comprobarse en el diagrama de la Figura 5.1. Así, los distintos bloques en los que se divide el sistema son: el motor EPOS, el sistema portafiltros, la cámara infrarroja PV-320 y la tarjeta de adquisición de National Instruments NI-6501.

Figura 5.1: Diagrama de bloques del sistema de adquisición.



En el diagrama pueden verse además las relaciones entre los componentes empleados y el tipo de interfaz que utilizan para llevar a cabo la comunicación con la aplicación de control.

A lo largo del capítulo describiremos cada uno de estos elementos, indicando la funcionalidad que aportan y justificando así las características que nos llevaron a su elección.

5.1. Motor EPOS

Nuestro sistema cuenta con un motor eléctrico de la compañía Maxon, que pertenece a la familia EPOS (*Easy-to-use Positioning*) de motores compactos (dotados de reguladores de control). Dicha familia se caracteriza por una gran precisión y fiabilidad en la respuesta, obtenida gracias a un *encoder*¹ digital de altas prestaciones basado en sensores de efecto Hall. Cabe destacar la facilidad de uso de esta familia de motores, ya que el fabricante provee los instrumentos virtuales necesarios para su control a través del entorno LabView. Esto hace que podamos controlar su funcionamiento mediante sencillas instrucciones y sea fácil su integración con el resto de componentes.

La velocidad de giro máxima permisible vendrá limitada precisamente por dichos sensores, tomando un valor de 12.000 rpm. Esto será más que suficiente para nuestra aplicación ya que, como comprobaremos experimentalmente, no superaremos las 200 rpm debido a las limitaciones impuestas por el software encargado del control del sistema completo.

Posee a su vez una unidad digital de control de posición, que nos permite codificar una rotación completa de 360° usando 4000 posiciones, lo que nos permite obtener una resolución angular de:

$$Resolución = \frac{360^{\circ}}{4000} = 0,09^{\circ} \quad (5.1.1)$$

5.1.1. Esquema de interconexión

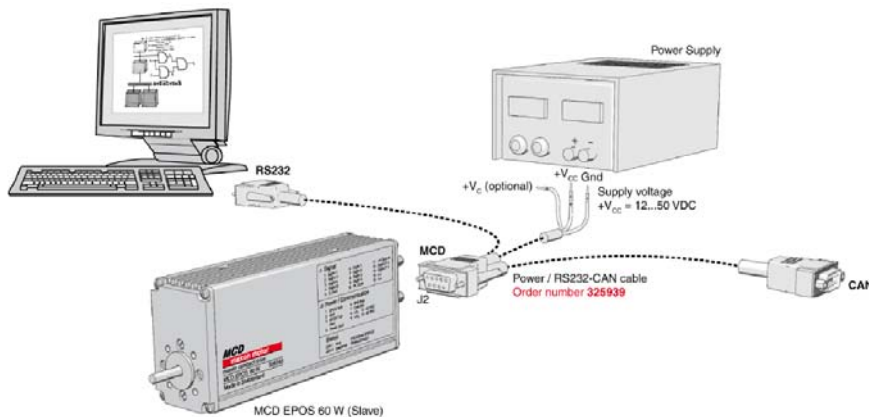
Como podemos ver en la Figura 5.2, nuestro motor nos ofrece dos posibles interfaces de comunicación. Podremos bien optar por el tradicional protocolo RS-232 o bien utilizar la conexión CAN (*Controller Area Network*) de altas

¹Un encoder es un transductor rotativo que transforma un movimiento angular en una serie de impulsos digitales, lo que nos permite realizar tanto medidas de posición como de velocidad de giro.

prestaciones. Dado que sólo disponemos de una interfaz RS-232 en nuestro ordenador y la compra de una interfaz CAN supone un importante desembolso (de en torno a los 1000 €²), emplearemos la conexión RS-232 provista sin que tenga mayor repercusión en el comportamiento del sistema.

En cuanto a la alimentación, nuestro motor será alimentado por corriente continua, para lo que utilizaremos una de las fuentes de tensión de las que disponemos en el laboratorio. El rango de tensión seleccionable variará entre 12 y 50 V_{DC} , lo que condicionará la máxima aceleración/deceleración del motor, por lo que utilizaremos el valor máximo proporcionado por la fuente, 30 V_{DC} , ya que estaremos especialmente interesados en que la rueda se detenga lo más rápido posible.

Figura 5.2: Esquema de interconexión del motor EPOS.



5.1.2. Proceso de regulación

Para minimizar en la medida de lo posible el error existente entre la posición o velocidad demandadas y su valor real el motor cuenta con tres reguladores de control realimentados [10] de corriente, posición y velocidad. Entre los que podemos distinguir dos configuraciones diferentes:

- Regulador PID (Proporcional Integral Derivativo). El principio de funcionamiento de este tipo de reguladores se basa en calcular primero el error cometido para después llevar a cabo una acción correctora en función de dicho error. La acción correctora o de control $c(t)$ que enviará al

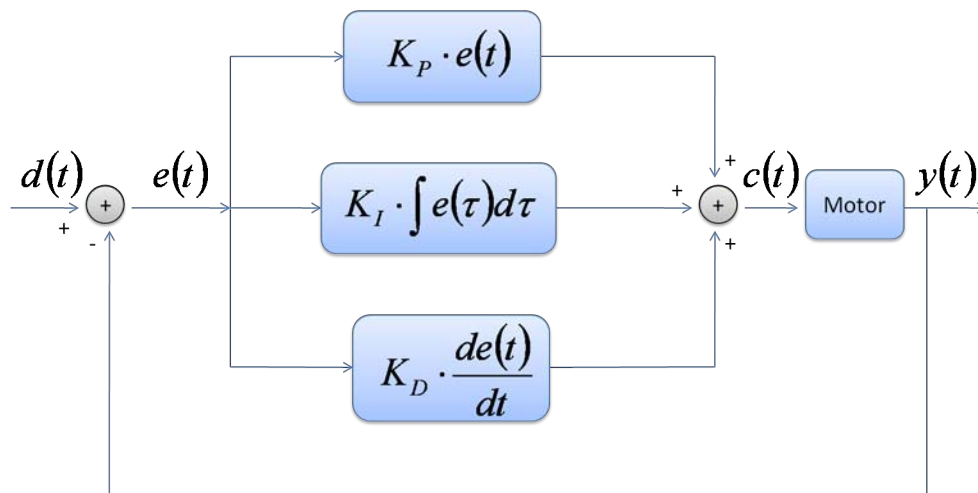
²Podemos encontrar un ejemplo del coste de este tipo de interfaces en la siguiente dirección <http://www.ni.com/can/esa/>.

motor vendrá dada por la siguiente expresión [10]:

$$c(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(\tau) d\tau + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1.2)$$

donde $e(t)$ representa el error estimado de acuerdo al diagrama de bloques de la Figura 5.3, siendo $d(t)$ e $y(t)$ los valores correspondientes a la señal de referencia y a la respuesta del motor repectivamente. La función de control está constituida por tres constantes, que generan una función de control dependiente del error obtenido en el instante anterior (constante proporcional), de su integral en el tiempo (constante integral) y de su derivada (constante derivativa).

Figura 5.3: Esquema de regulador PID.



- Regulador PI (Proporcional Integral). Este regulador se corresponde con un caso particular del anterior, en el que la función de control sólo tiene en cuenta las componentes proporcional e integral del error, por lo que se usará en los casos en los que las variaciones del error con respecto a la señal de referencia sean relativamente pequeñas.

Una vez explicado su cometido, procederemos al ajuste de los parámetros de cada uno de los reguladores (corriente, velocidad y posición). El objetivo del ajuste es lograr que el bucle de control corrija eficazmente y en el menor tiempo

posible los efectos de las perturbaciones, para lo que emplearemos la herramienta *Regulation Tuning* provista por el fabricante. Dicha herramienta nos permite ajustar los parámetros de forma sencilla, ya que sólo tendremos que fijar sus valores iniciales y la herramienta realizará un ajuste iterativo mostrándonos de forma gráfica el valor obtenido y el error cometido para cada iteración de un conjunto de tests. A la hora de seleccionar los valores iniciales, deberemos tener en cuenta que de ellos depende la estabilidad del sistema, por lo que podremos encontrar conjuntos de valores desde los que no pueda realizarse el ajuste.

Regulador de corriente

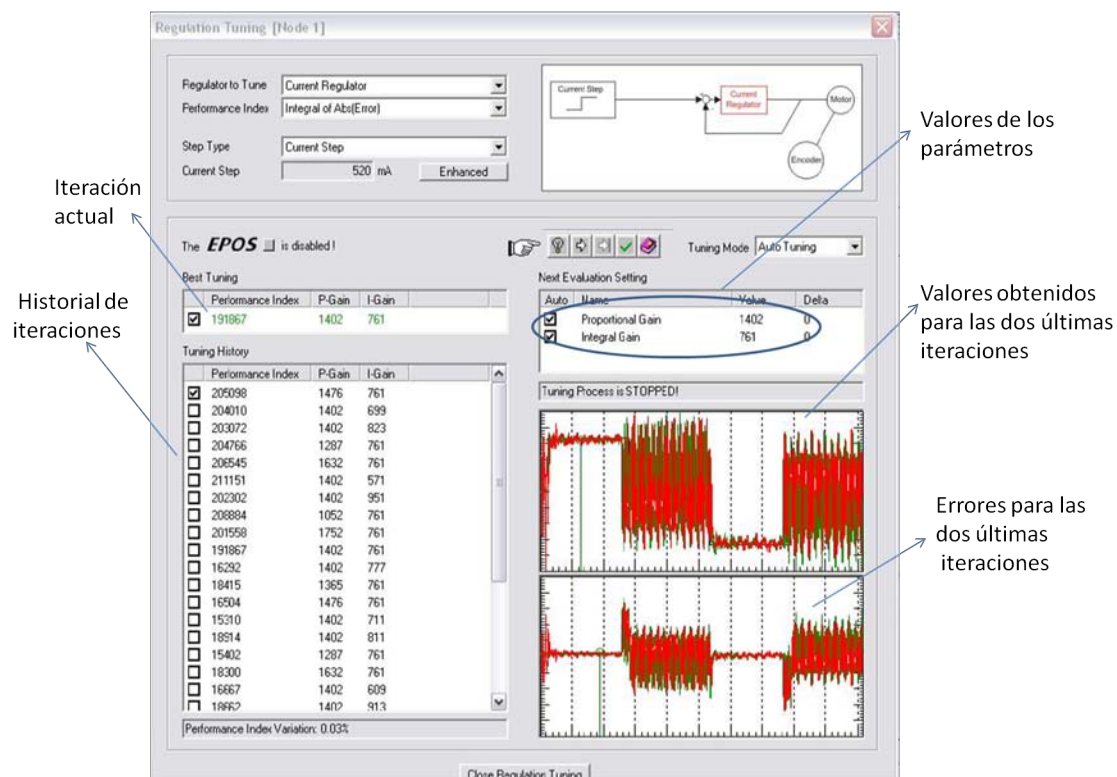
Está basado en un regulador PI, por lo que obtendremos los valores correspondientes a las constantes proporcional e integral únicamente. En la Figura 5.4 podemos ver el proceso de regulación empleando la herramienta proporcionada por el fabricante. Para realizar un seguimiento del algoritmo, podemos consultar los valores de todas las iteraciones realizadas, así como de los errores asociados a ellas. El proceso de regulación finalizará una vez la suma del valor absoluto de los errores cometidos durante un periodo de tiempo sea menor que un cierto valor umbral, que dependerá de los requerimientos de nuestra aplicación. En nuestro caso hemos empleado los valores propuestos por la aplicación de regulación.

Tras el proceso, hemos obtenido los valores mostrados en la Tabla 5.1, donde dichos parámetros no tienen asociada unidad alguna ya que representan ganancias.

Cuadro 5.1: Parámetros PI del regulador de corriente.

Parámetro	Valor obtenido
Proporcional	1402
Integral	761

Figura 5.4: Regulador de corriente.



Regulador de velocidad

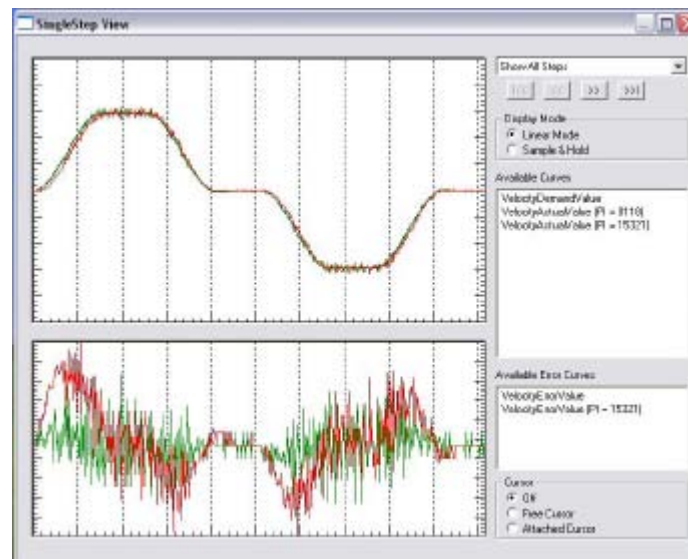
En el siguiente paso nos encargaremos del regulador de velocidad (también de tipo PI), y ya que el proceso a seguir es idéntico al empleado en el regulador anterior, nos limitaremos a mostrar los valores de los parámetros que hemos obtenido junto con las gráficas asociadas a las dos últimas iteraciones.

En la Tabla 5.2 se muestran dichos parámetros, que se corresponden con las gráficas de la Figura 5.5. En ella se puede comprobar como la última iteración (de color verde en la gráfica) supone una reducción del nivel de error con respecto a la iteración anterior (de color rojo).

Cuadro 5.2: Parámetros PI del regulador de velocidad.

Parámetro	Valor obtenido
Proporcional	452
Integral	151

Figura 5.5: Dos últimas iteraciones del regulador de velocidad.



Regulador de posición

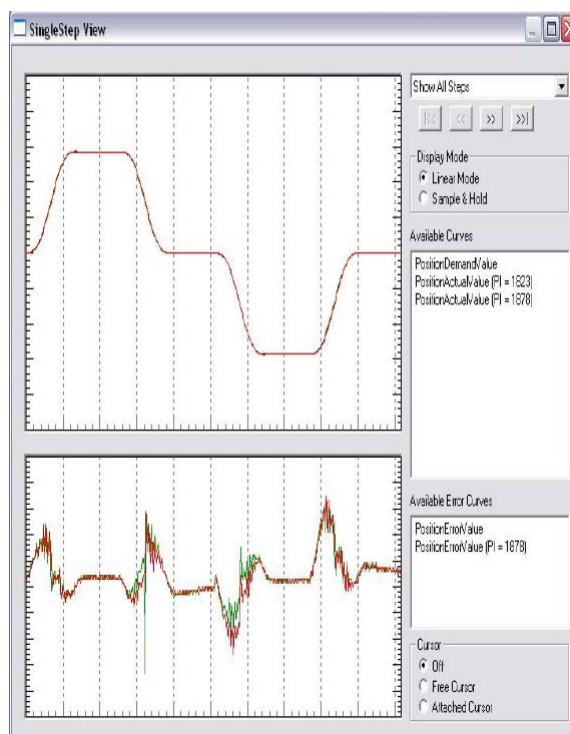
Por último, sólo nos quedan obtener los parámetros asociados al regulador de posición. En este caso emplea una configuración PID debido a las mayores variaciones del error, a diferencia de los anteriores reguladores que no disponían de constante derivativa, por lo que tendremos que obtener los parámetros del modelo completo.

Salvo el número de parámetros a obtener, el resto del proceso es idéntico a los casos anteriores, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 5.3 asociados a la última iteración (verde) de la gráfica de la Figura 5.6.

Cuadro 5.3: Parámetros PID del regulador de posición.

Parámetro	Valor obtenido
Proporcional	170
Integral	10
Derivativo	200

Figura 5.6: Dos últimas iteraciones del regulador de posición.



Finalmente, una vez que hemos concretado el valor de todos los parámetros para los tres reguladores, deberemos salvar los resultados en la memoria del motor, para que de esta forma no tengamos que repetir el proceso de regulación cada vez que lo utilicemos.

5.2. Cámara PV320

En la actualidad el mercado nos ofrece la posibilidad de poder elegir entre diversos tipos de tecnologías dentro del campo de la termografía infrarroja. Pese a esto, la mayor parte de los diseños actuales están basados en arrays de plano focal (*Focal Plane Array (FPA)*), esto es, un array bidimensional de detectores infrarrojos usados para crear la imagen, como ya hemos explicado en el capítulo dedicado a los detectores.

En nuestra aplicación emplearemos el modelo PV320-L2ZE de la compañía Electrophysics (Figura 5.7), cuyo principal atractivo reside en su elevado ancho de banda, que abarca desde 0.6 hasta $20\mu m$. Sin embargo, no podremos acceder a todo el rango espectral empleando una única lente, por lo que el ancho de banda efectivo se verá reducido en nuestro caso al intervalo comprendido entre 2 y $20\mu m$. Gracias a este rango podremos obtener imágenes de todas las regiones del infrarrojo: cercano, medio y térmico. Más adelante comentaremos la información y ventajas que este hecho nos reporta en el posterior procesamiento de las imágenes.

Figura 5.7: Imagen de la cámara PV-320.



Cada uno de los elementos del FPA estará constituido por un detector de tipo piroeléctrico. El modelo PV-320 utiliza un refrigerador termoeléctrico de una sola etapa (*ThermoElectric Cooler*) que mantiene el detector a una temperatura estabilizada (habitualmente 295 K) ante variaciones en la temperatura de ambiente. El objetivo de la refrigeración es mantener el material ferroeléctrico de los detectores a temperaturas cercanas a la temperatura de transición ya comentada en el capítulo 4.

En cuanto al proceso de lectura, nuestro modelo utiliza un array de 320x240 condensadores (píxeles), que son barridos cada 20ms (proporcionándonos 50 fps³). Estos 20ms será lo que nos fijará la velocidad de giro máxima de la rueda portafiltros, aunque debido al tiempo empleado en las operaciones de control del sistema nunca podremos alcanzar dicha cota.

La temperatura de cada píxel varía en función del movimiento de las aspas del *chopper*, lo que conlleva cambios en la polarización que producen un flujo de corriente en el circuito asociado a cada píxel. Posteriormente tiene lugar una etapa de amplificación (típicamente en configuración de transimpedancia), obteniendo así una versión amplificada del voltaje asociado a la variación de carga en el detector. En la etapa de amplificación se utiliza condensadores de reset de forma síncrona a los movimientos del *chopper*, garantizando que el voltaje obtenido se debe exclusivamente al periodo en que las aspas del *chopper* permiten iluminar el detector. Este proceso es llevado a cabo mediante el uso de *switches* con ciclos de reloj distintos para cada fila del array detector.

El fabricante nos proporciona además la sensibilidad asociada a los detectores. En nuestro caso, dado que la respuesta de un detector piroeléctrico es espectralmente plana (Figura 4.4), tendremos una dependencia de la sensibilidad con la longitud de onda debida a los elementos ópticos de la cámara IR. Por ello el fabricante nos especifica tres valores de la sensibilidad para tres longitudes de onda distintas como podemos ver en la Tabla 5.4.

Cuadro 5.4: Valores de sensibilidad para la cámara PV-320.

Longitud de onda (μm)	Sensibilidad ($u.a.$)
2.7	5
5.0	15
10.6	3

Por otro lado, la resolución en temperatura que podremos obtener en el rango de funcionamiento (-20 a 50°C) queda especificada por el fabricante por un valor de 0.08°C, que vendrá limitada por el nivel de ruido del sistema completo. El conversor A/D tiene una longitud de 12 bits y presenta además un sistema de ganancia y nivel de offset que puede utilizarse en modo automático, de forma

³Del término inglés *frames per second* que hace referencia al número de imágenes por segundo que la cámara nos proporciona.

que podremos variar la resolución obtenida manipulando dicho parámetro. Debemos tener en cuenta que si seleccionamos el modo de ganancia automática perderemos toda la información radiométrica asociada a la imagen.

Como característica adicional, la cámara nos permite realizar un promediado sobre un número seleccionable de imágenes, cuyo objetivo es la reducción de la varianza del ruido, lo que mejora su visualización. Si consideramos nuestras fuentes de ruido como independientes, éstas podrán ser sumadas formando un sólo proceso estocástico, donde la desviación típica de dicho proceso se verá reducida en un factor \sqrt{N} , siendo N el número de imágenes sobre el que se promedia. En el *Anexo I* podemos ver el desarrollo estadístico que justifica este resultado.

Una vez descritas las principales características funcionales, sería destacable comentar que el dispositivo cuenta con una interfaz de tipo USB, que emplearemos tanto para labores de comunicación como para la transmisión de las imágenes, lo que nos aporta una mayor flexibilidad y libertad en la interconexión con equipos portátiles fundamentalmente.

Además, consta de una salida de video codificada según el estándar PAL, que nos permitirá el acceso directo a las imágenes adquiridas.

Por último, deberemos destacar que, debido a la estabilización del detector, se hace necesaria una espera de unos 30 minutos posteriores al encendido de la cámara antes de adquirir las imágenes.

5.3. Sistema portafiltros

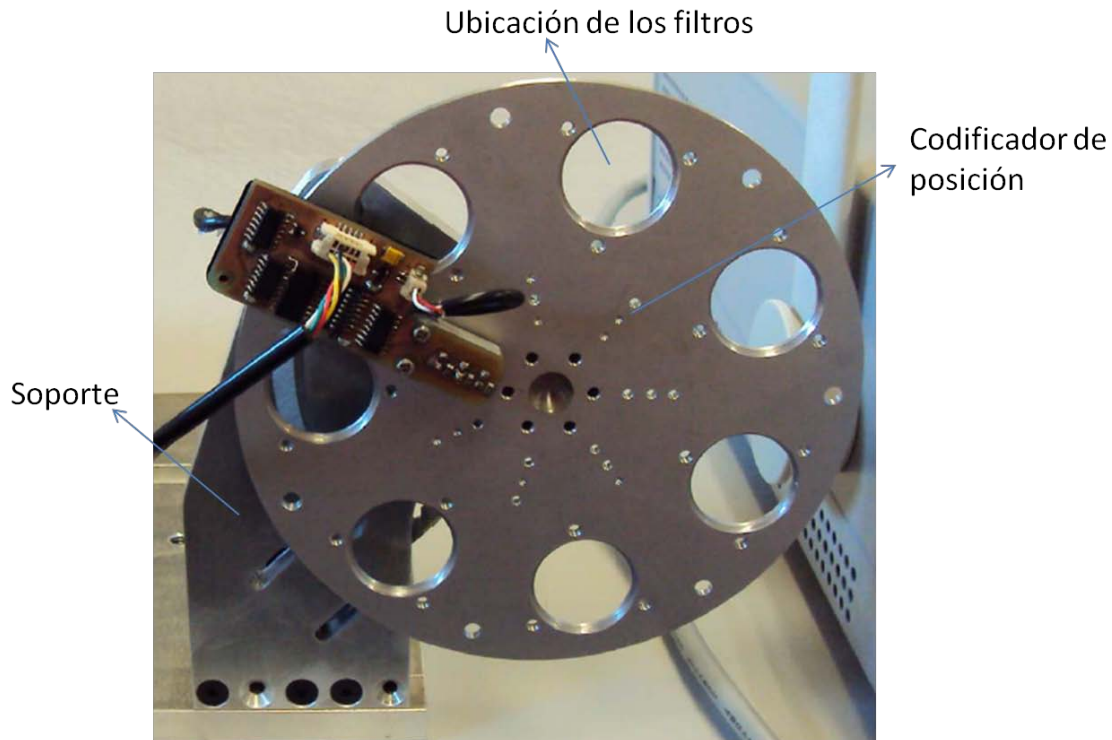
El sistema portafiltros fue diseñado por la Oficina Técnica de la Universidad Carlos III de Madrid, y será uno de los elementos clave de nuestro sistema de selección espectral dado que en él se ubicará la rueda portafiltros que contendrá los filtros interferenciales (hasta un total de siete), para lo que requeriremos portafiltros variables en función del grosor de cada filtro.

Además de servir de soporte para los filtros ópticos, proveerá a nuestro sistema de adquisición de múltiples funciones:

- Transmisión del movimiento del motor, para lo que empleará un sistema de correas de relación 1:1, por lo que una vuelta completa del motor se corresponderá exactamente con una vuelta de la rueda.
- Soporte para la electrónica de control, dado que se requiere ubicar tanto en el reverso como en el anverso de la rueda los circuitos emisor y receptor.

- Posibilidad de adaptar la posición relativa entre los filtros y la cámara IR gracias a una referencia móvil. Dicha referencia nos permite desplazar la electrónica de control, moviendo así los circuitos emisor y detector.

Figura 5.8: Rueda portafiltros.

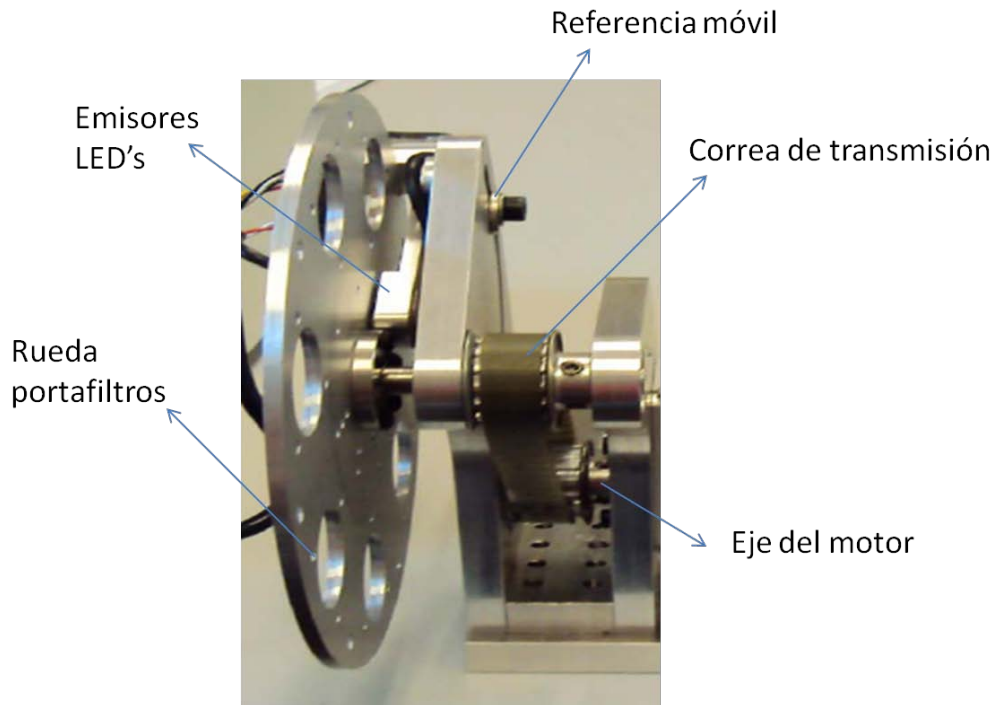


- Codificación de cada uno de los filtros gracias a lo que denominaremos codificadores de posición. Dichos codificadores se componen de un conjunto de tres muescas situadas en dirección radial a partir del centro de la rueda. Las muescas pueden ser completas o no, esto es que dejen pasar o no la luz, por lo que dispondremos de tres bits para codificar los siete filtros interferenciales. La única combinación no permitida sería la correspondiente a que ninguna de las muescas deje pasar la luz, debido a que no nos serviría para diferenciar cuando uno de los filtros se encuentra delante de la cámara. En el siguiente capítulo ahondaremos más en este elemento dado que representa una parte importante de la sincronización.

En la Figura 5.8 podemos ver una vista frontal del sistema portafiltros. En ella se pueden apreciar los lugares en los que se colocarán los filtros, así como

los codificadores de posición que emplearemos tanto en la sincronización del sistema como en la diferenciación de los filtros activos.

Figura 5.9: Sistema de transmisión del movimiento.



Por otra parte, en la Figura 5.9 tenemos una vista lateral del sistema portafiltros, en la que podemos diferenciar los elementos de transmisión del movimiento del motor hacia la rueda. Dicha imagen también puede sernos de utilidad para poder ubicar el lugar en donde se hallan los emisores LED, ya que se encuentran acoplados internamente en la parte móvil del sistema situada en el reverso de la rueda, motivo por el cual no pueden apreciarse a simple vista. Así mismo, se aprecia también en la parte superior la referencia móvil mencionada, que servirá de soporte a la electrónica de control.

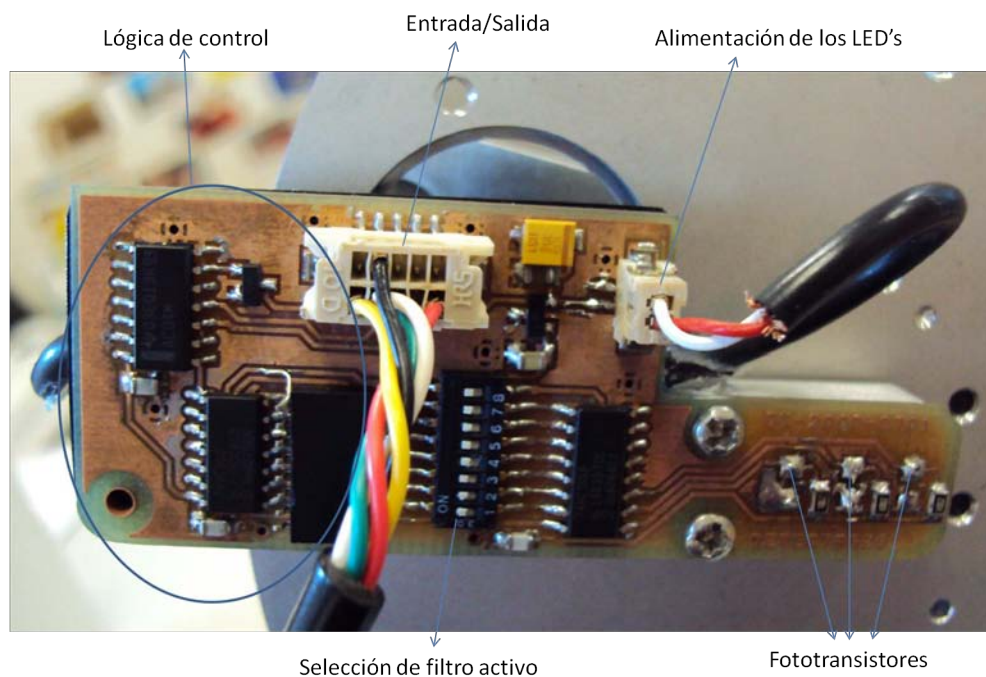
5.4. Electrónica de control

La electrónica de control fue también diseñada y montada en la Oficina Técnica de la Universidad Carlos III de Madrid, y será la encargada de generar

las señales que nos indiquen la presencia de un filtro activo frente al objetivo de la cámara IR. Para analizar su cometido diferenciaremos en ella los siguientes bloques:

- *Emisores LED*. Se trata de tres diodos LED que, como hemos indicado en la sección anterior, se encuentran situados en la parte posterior de la rueda portafiltros.
- *Circuito receptor*. Compuesto por tres fototransistores que son dispuestos en la parte anterior de la rueda, de forma que ésta última quede situada entre los emisores LED y el circuito receptor.

Figura 5.10: Electrónica de control.



- *Lógica de control*. En este bloque podemos distinguir a su vez dos funcionalidades:
 - Selección de los filtros que deseamos activar mediante un *switch*. Como podemos ver en la Figura 5.10, dicho *switch* consta de ocho

interruptores con los que podremos seleccionar cada uno de los filtros, de forma que el octavo interruptor identifica como activos todos los filtros de la rueda.

- Una vez seleccionados los filtros deseados, la electrónica deberá ser capaz de discernir entre los filtros activos y aquellos que no lo son, para lo que requerirá de una cierta lógica (ver Anexo II).

La tensión de entrada a la que alimentaremos este dispositivo estará en torno a los 12V, aunque este valor es relativamente flexible ya que internamente cuenta con un regulador de tensión de 5V.

5.4.1. Señal de salida

Por otra parte, la electrónica de control nos ofrece la posibilidad de escoger entre tres posibles señales de salida: una activa a nivel bajo, otra a nivel alto y por último una señal en colector abierto. Para nuestro propósito, utilizaremos únicamente la señal activa a nivel bajo, desechando las otras dos. La justificación de esta elección reside en las características de la tarjeta de adquisición, que serán expuestas en la siguiente sección.

Independientemente de la salida escogida, la señal obtenida será digital y de tipo TTL (*Transistor Transistor Logic*)⁴. Debido a esto, en nuestro caso tendremos un 'cero' lógico cada vez que uno de los filtros activo se encuentre justo delante de la óptica de la cámara IR, y, en caso contrario, la salida se corresponderá con un 'uno' lógico.

5.5. Tarjeta de Adquisición

El último recurso hardware que analizaremos será la tarjeta de adquisición NI-6501. Gracias a dicha tarjeta podremos utilizar las señales proporcionadas por la electrónica de control dentro de nuestra aplicación. Pero más aún, este dispositivo no es una mera interconexión pasiva en el sentido de que no realice ninguna función exceptuando la adquisición de las señales, sino que aprovecharemos alguna de las funcionalidades que el fabricante nos ofrece. De esta forma, haremos uso de un *registro contador de flancos*, implementado en la propia tarjeta, y que nos será de gran utilidad en el procesado de las señales de control.

⁴La tecnología TTL tiene como característica el uso de transistores bipolares. Los niveles lógicos quedan definidos por un rango de tensión entre 0.2 y 0.8V para el nivel bajo y entre 2.4 y Vcc para el nivel alto.

Podremos acceder a dicho registro de contador mediante funciones software en nuestra aplicación LabView, como veremos en mayor profundidad en el capítulo 7. Sin embargo, deberemos de tener en cuenta que dicho contador sólo podrá ser configurado para la cuenta de flancos de bajada, por lo que tendremos que utilizar la salida activa a nivel bajo proporcionada por la electrónica de control, como ya mencionamos. Dicha consideración será esencial para una correcta sincronización en nuestro sistema, y conformará uno de los puntos más sensibles de nuestro diseño en cuanto a la correcta adquisición de las imágenes.

Una vez explicada la función de este dispositivo en nuestro sistema de control, especificaremos las características más relevantes que este modelo nos ofrece, así como los motivos por los que fue elegido para nuestra aplicación.

En primer lugar, decidimos emplear una tarjeta de adquisición de la empresa *National Instruments* ya que ésta misma compañía es la responsable del entorno de programación que hemos escogido, *LabView*, y de esta forma aseguraremos en gran medida la compatibilidad con respecto a la interacción con nuestra aplicación de control. Así, la tarjeta de adquisición se convertirá en un elemento más de nuestras rutinas de programación sin demasiados problemas.

Figura 5.11: Tarjeta de Adquisición NI-6501.



Tomando como punto de partida la compañía *National Instruments* deberemos, no obstante, escoger el modelo que más se adapte a nuestros requerimientos tratando de paliar en la medida de lo posible el desembolso que conllevará.

Así, decidimos emplear un modelo de tipo USB, ya que esta familia nos ofrece un destacable compromiso entre funcionalidad y coste. Además, nos interesa que el conexionado sea de tipo USB, en detrimento de otros formatos como RS232 por ejemplo, debido a la popularidad de este formato y a su extendido uso en ordenadores portátiles, donde hay modelos que sólo disponen de este tipo de interconexión.

Tras esto, el siguiente parámetro de interés de nuestra tarjeta será el tipo de señales que ha de admitir, digitales o analógicas, y su carácter, entrada o salida. Teniendo en cuenta que nuestro sistema sólo dispondrá de una única señal de entrada digital, conectada al registro contador, el modelo NI-6501 se convierte en el idóneo para nuestros requerimientos, ya que nos proporciona 24 canales entrada/salida de tipo digital.

El contador de flancos requiere una entrada mínima de ancho de pulso de 100 ns y una frecuencia máxima de la fuente de 5 MHz , lo que nos limitará la máxima frecuencia de giro de la rueda. Para calcular cuál sería la máxima frecuencia detectable supondremos que tenemos activos los siete filtros de la rueda (peor caso) y pasaremos de revoluciones por minuto a Hz para poder comparar ambos valores:

$$t_{\text{filtro-filtro}} = \frac{60\text{ s}}{V\text{ rpm}} \times \frac{1}{7\text{ filtros}} = \frac{8,57}{V}\text{ s} \quad (5.5.1)$$

$$\Rightarrow \frac{8,57}{V}\text{ s} = \frac{1}{5\text{ MHz}} \Rightarrow V = 42,85\text{ Mrpm} \gg 12000\text{ rpm} \quad (5.5.2)$$

Por lo tanto la tarjeta de adquisición no constituirá un elemento limitante del sistema de adquisición puesto que estaremos limitados en todo caso por la velocidad máxima de giro del motor, pese a que esta no sea la condición más restrictiva.

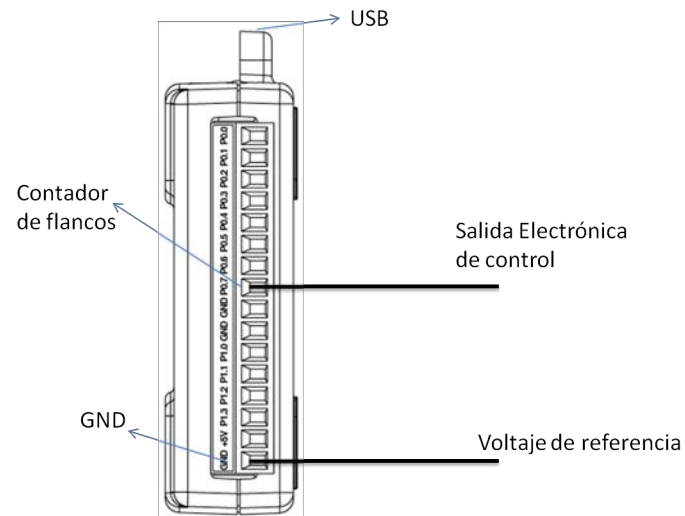
5.5.1. Esquema de conexionado

Por último, en la Figura 5.12 se muestran las conexiones que hemos necesitado para el funcionamiento de la tarjeta. Como podemos ver, el esquema es bastante simple ya que únicamente deberemos conectar:

- Un voltaje de referencia en cualquiera de los terminales etiquetados como GND (nosotros hemos elegido el PIN 32).

- La señal de salida de la electrónica de control (TTL) al PIN 7 del puerto 0, que es donde se encuentra el contador de flancos.

Figura 5.12: Conexionado de la tarjeta NI-6501.



Capítulo 6

Principio de funcionamiento

Una vez presentados los elementos de los que consta nuestro sistema multiespectral, nos encontramos en condiciones de explicar el proceso de sincronización llevado a cabo. A pesar de su brevedad, este capítulo será de vital importancia para la comprensión de la aplicación desarrollada, por lo que trataremos de describir con la mayor cantidad de detalles posible cada uno de los pasos que llevaremos a cabo.

Por último, en la sección final del capítulo presentaremos algunas imágenes del sistema completo, lo que nos ayudará a tener una visión más intuitiva y completa de la solución aquí propuesta.

6.1. Instantes de adquisición

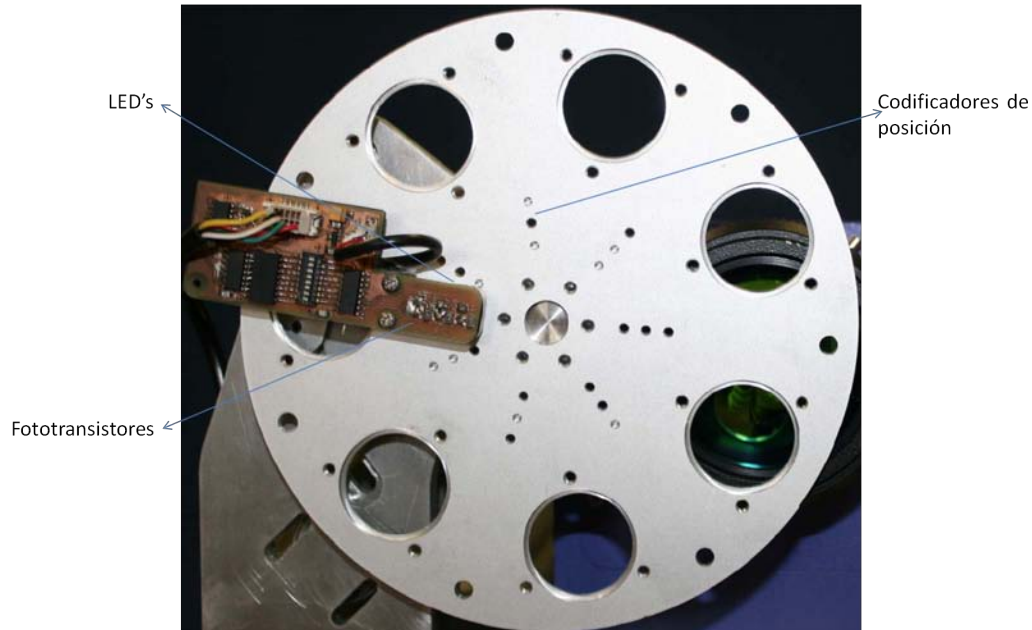
El principal problema al que nuestro sistema se enfrentará será la correcta sincronización de todos los elementos involucrados, de forma que seamos capaces de adquirir sólo en aquellos instantes de tiempo en los que se encuentre uno de los filtros interferenciales activos delante del objetivo de nuestra cámara IR.

El problema de diferenciar cuál de los filtros de la rueda se encuentra activo ya es abordado por la electrónica de control, por lo que sólo deberemos de preocuparnos de seleccionar aquellos filtros que nos interesen.

Una vez hecho esto, el siguiente paso consistirá en la elección del instante de adquisición apropiado. Para ello, la rueda portafiltros cuenta con una serie de codificadores de posición de tres bits, como fue comentado al describir el sistema portafiltros y podemos ver en la Figura 6.1. Con sus diferentes combinaciones podemos representar cada uno de los siete filtros, exceptuando la

correspondiente a no tener ninguna muesca completa que carecería de sentido.

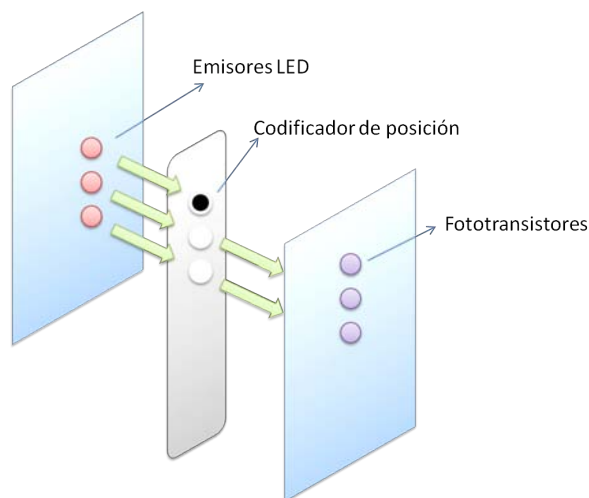
Figura 6.1: Elementos de sincronización.



Siguiendo la Figura 6.1, cuando la rueda gire los codificadores de posición pasarán por delante de los diodos LED's. Y al producirse el alineamiento entre las muescas, los LED's y los fototransistores (Figura 6.2), la potencia óptica generada por los diodos incidirá sobre al menos uno de los fototransistores.

Para que dicho alineamiento coincida a su vez con que uno de los filtros activos se encuentre justo delante de la óptica de la cámara IR, deberemos de ajustar primero la parte móvil de la rueda portafiltros, en la que se encuentra la electrónica de control, de forma que se pueda adaptar al uso de distintos modelos de cámaras IR, cada uno de ellos con unas dimensiones diferentes.

Figura 6.2: Esquema de alineamiento.

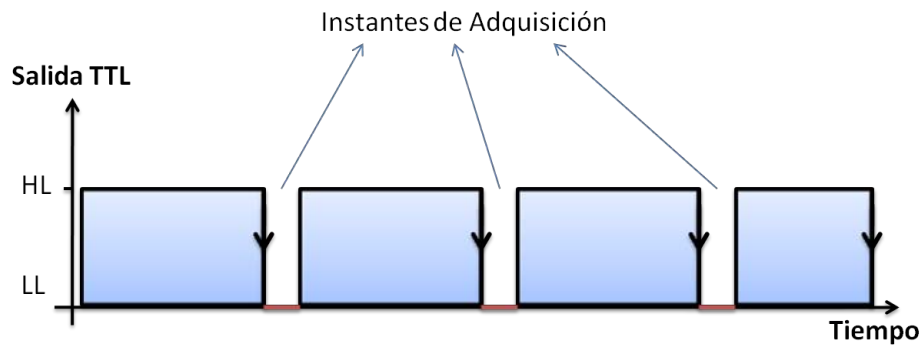


Al producirse el alineamiento, y de acuerdo al codificador de posición que se encuentre en ese instante, tendremos una determinada combinación de fototransistores iluminados por los diodos LED. Cuando un fototransistor es iluminado con la suficiente potencia óptica pasa a un estado de saturación, en el cual la tensión emisor-colector toma un valor fijo y relativamente pequeño, de aproximadamente unos $V_{CE} \simeq 0,15 V$. En contrapartida a esta situación, en ausencia de iluminación se encuentra en un estado denominado de corte, por el que la tensión emisor-colector, toma un valor de aproximadamente la tensión de alimentación, $V_{CE} \simeq 5 V$ (en el Anexo III puede corroborarse esta situación consultando los esquemas asociados).

Las tensiones emisor-colector de los tres fototransistores son empleadas por la lógica de control para discernir si la combinación detectada se corresponde con alguno de los filtros previamente seleccionados como activos. Como ya indicamos, seleccionaremos aquella salida activa a nivel bajo, de acuerdo a lo expuesto en la descripción de la tarjeta de adquisición, puesto que el registro contador con el que contamos sólo detecta flancos de bajada.

Así pues, la señal de salida de la lógica de control tendrá un aspecto semejante a la representación de la Figura 6.3, lo que permitirá a nuestro registro contador poder detectar los flancos de bajada asociados a los instantes en los que deberemos de proceder a la adquisición.

Figura 6.3: Instantes de adquisición.



6.2. Sistema completo

Finalmente, mostraremos dos imágenes del sistema completo real:

- La primera de ellas se trata de una vista frontal, en la que se pueden apreciar los filtros interferenciales con sus correspondientes portafiltros y la parte accesible de la electrónica de control.
- En la segunda imagen se muestra una vista lateral, en la que se podemos distinguir todos los elementos que intervienen en la sincronización del sistema exceptuando la tarjeta de adquisición.

Figura 6.4: Vista frontal del sistema de adquisición multispectral.

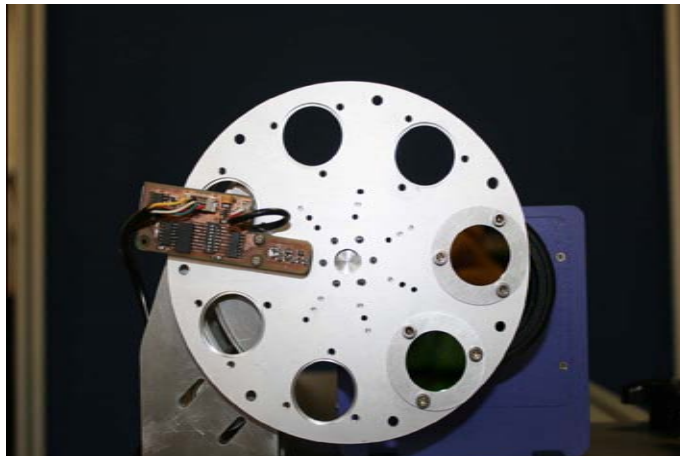
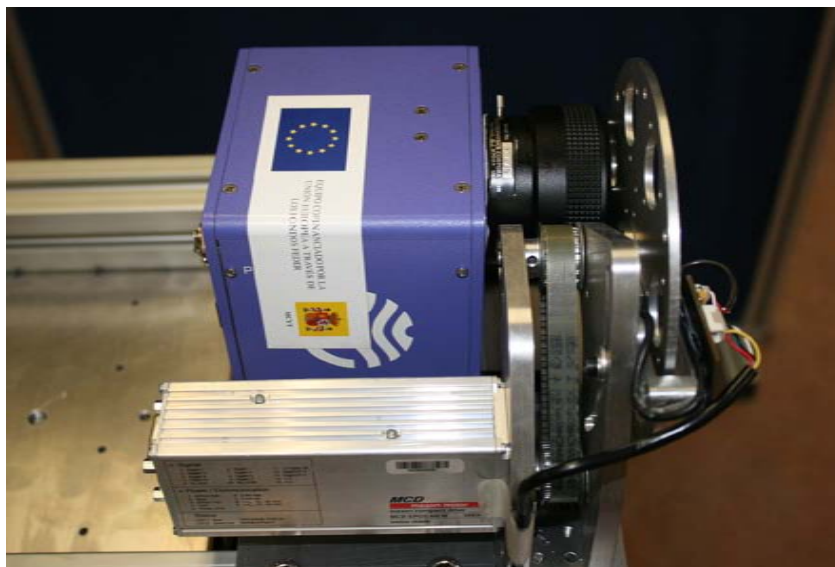


Figura 6.5: Vista lateral del sistema de adquisición multispectral.



Capítulo 7

Software de control

7.1. Introducción a LabView

En esta sección trataremos de dar al lector una breve descripción acerca del lenguaje de programación empleado en nuestra aplicación, con el objetivo de resultar de ayuda a una mejor comprensión de la algorítmica que será descrita en las secciones siguientes.

LabView fue desarrollado por *National Instruments* y se engloba dentro de la familia de lenguajes de programación gráficos, conocidos en la literatura como *G languages* [24]. Las siglas de LabView se desglosan en *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, lo que sugiere su carácter especialmente aplicado a la instrumentación y automatización de todo tipo de procesos.

En sus inicios, LabView fue desarrollado con la intención de proporcionar una herramienta que simplificara las arduas tareas de programación que implicaban la automatización y el control de procesos industriales. Su carácter gráfico se convirtió en una de sus mayores bazas para facilitar el desarrollo de aplicaciones, especialmente para aquellas personas que no estaban habituadas a estas labores y para las que el resto de lenguajes (como ensamblador, C, Pascal,...) les resultaban demasiado abstractos.

La gran cantidad de herramientas de medida, control y gestión de aplicaciones, junto con una enorme variedad de librerías provistas por los fabricantes de dispositivos, convierten a este lenguaje de programación en ideal para la realización de todo tipo de medidas y tests, así como para la adquisición de todo tipo de señales provenientes de los más diversos entornos. Debido a esto, podemos encontrar aplicaciones LabView tanto en procesos industriales como en aplicaciones del ámbito de la instrumentación médica, donde su uso es am-

pliamente extendido.

Tras esta breve caracterización del tipo de lenguaje utilizado, procederemos a presentar los principales elementos que lo componen, analizando sus aspectos funcionales más importantes de cara a su posterior utilización.

7.1.1. Instrumentos virtuales

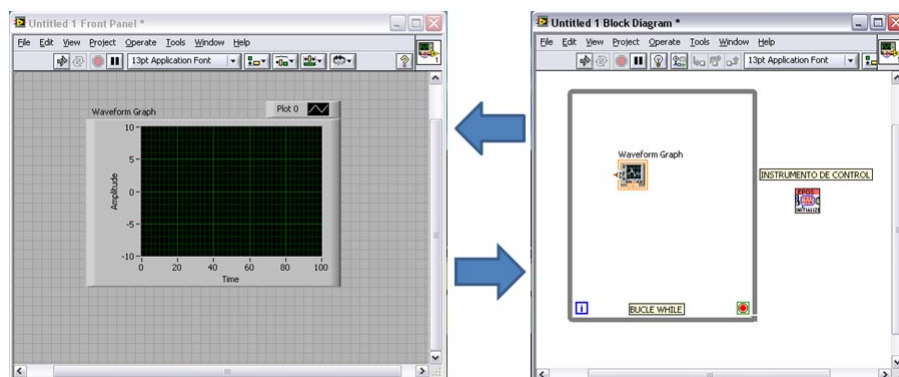
El concepto de *instrumento virtual* (*Virtual Instrument (VI)*) es de especial relevancia a la hora de explicar la metodología de trabajo de este lenguaje. De una forma intuitiva podemos asociar este concepto al de rutina o función en un lenguaje de programación secuencial, de forma que nuestra aplicación estará constituida por un conjunto de instrumentos virtuales que serán los encargados tanto de la algorítmica como de la funcionalidad, de modo que tendremos instrumentos virtuales que simbolicen desde bucles *while* hasta aplicaciones completas.

Cada uno de estos VIs consta de tres elementos distintos. Por un lado un panel frontal o *front panel*, que se encarga de la interacción gráfica con el usuario y de la visualización. Por otro, un diagrama de bloques o *block diagram* en el que se implementa la funcionalidad asociada a dicho VI y que se basará a su vez en otros instrumentos virtuales. Y, finalmente, un icono que representará al instrumento dentro del entorno gráfico.

Diversos lenguajes de programación como C o .NET utilizan funciones y subrutinas como elementos de programación, y de igual manera LabView utiliza dichos VIs. El panel frontal gestiona las entradas y salidas y, el diagrama de bloques el trabajo realizado por el instrumento. Debido a esto, podremos utilizar un VI tanto como una interfaz de usuario como una subrutina en nuestra aplicación abstrayéndonos del entorno gráfico.

En la Figura 7.1 podemos encontrar algunos ejemplos de instrumentos virtuales. Podemos observar como el instrumento *Waveform Graph* tiene representación tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques. Por otro lado, los otros dos VIs mostrados ejemplifican lo explicado previamente. Uno de ellos es un simple bloque de control de flujo *while*, y el etiquetado en la figura como “INSTRUMENTO DE CONTROL” representa una de las funciones que posteriormente utilizaremos en nuestra aplicación real, y que realiza una tarea mucho mas compleja en la inicialización del motor de nuestro sistema.

Figura 7.1: Ejemplos de instrumentos virtuales.



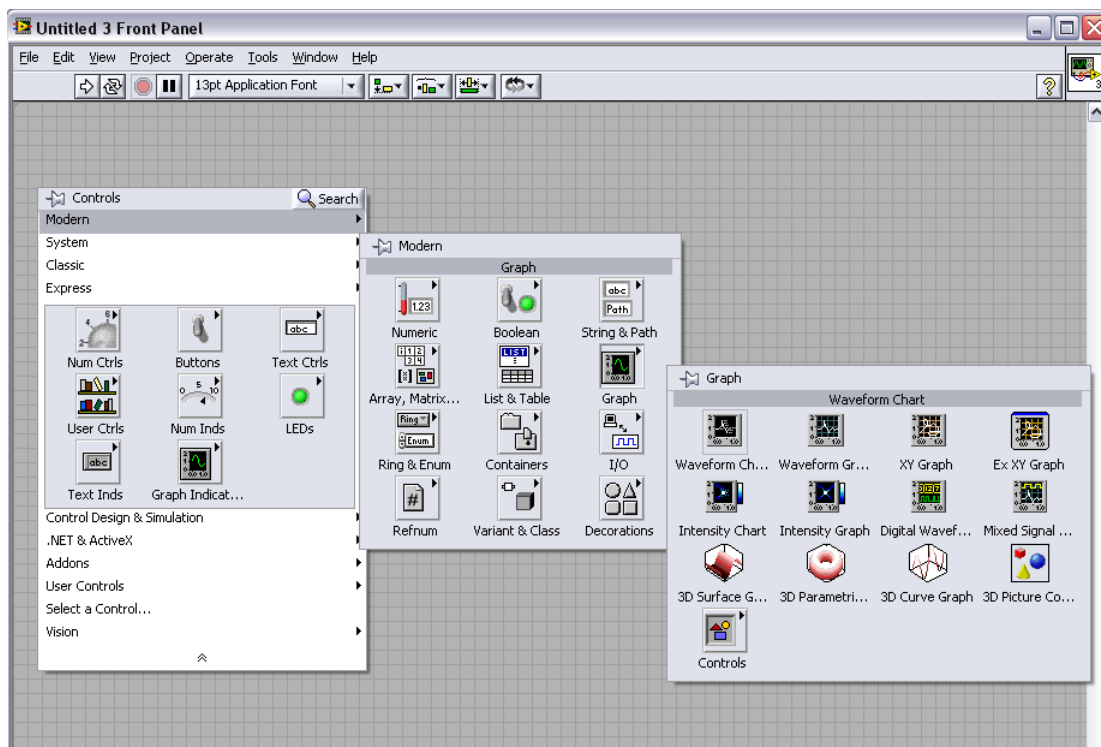
Otra de las ventajas de este lenguaje es que la mayoría de fabricantes de dispositivos ofrece multitud de librerías LabView con las que podremos interactuar con sus productos, ya que dichas librerías incluyen VIs que representan las habituales rutinas .dll¹, lo que facilita enormemente la programación, integrando elementos tanto de alto como de bajo nivel.

7.1.2. Panel frontal en LabView

LabView nos permite realizar sin demasiado esfuerzo paneles elaborados que gestionen la interacción con el usuario, poniendo a nuestra disposición multitud de elementos de control y visualización que nos ayudarán a crear una interfaz gráfica para comunicarnos fácilmente con nuestra aplicación.

¹Cuyas siglas en inglés son *dynamic-link library* y es el término con el que comúnmente se hace referencia a archivos que contienen código ejecutable que el sistema operativo puede usar directamente.

Figura 7.2: Elementos de un panel frontal.



Podremos customizar el entorno gráfico de nuestra aplicación aprovechando algunas características como [24]:

- El panel frontal se puede personalizar bien usando los menús asociados a los controles e indicadores o bien importando gráficos. También nos permite variar el tamaño de los objetos manualmente o indicar que éstos varíen automáticamente cuando lo haga la ventana.
- Es posible asignar combinaciones de teclas a los controles de forma que se agilice el acceso a éstos por parte de los usuarios.
- También podremos modificar los colores de la mayoría de los elementos, aunque no de todos, mediante la utilización de herramientas de coloreado que el propio LabView ofrece.
- Posibilidad de agrupar varios elementos llevando a que éstos formen un mismo bloque, de forma que permita su configuración como si de un

sólo elemento se tratara, manteniendo y/o escalando la distancia entre elementos y las características de cada uno de ellos.

7.1.3. Diagrama de bloques

Pese a su inicial búsqueda de sencillez, LabView está diseñado para hacer frente a aplicaciones complejas y con altos requerimientos de fiabilidad. A continuación expondremos las principales características funcionales de este lenguaje, que al mismo tiempo lo convierten en ideal para nuestra aplicación en concreto [24]:

- El flujo de instrucciones ejecutadas no sigue una dirección prefijada (de izquierda a derecha o de arriba a abajo), sino que cada uno de los instrumentos virtuales se ejecutará cuando tenga disponible el acceso a todas sus entradas.
- La mayor parte de fabricantes de instrumentos hardware provee librerías con toda la información necesaria para la correcta integración de su producto en LabView. Esto facilita en gran medida la gestión en una misma aplicación de instrumentos a priori dispares, como es el caso de nuestro sistema de adquisición.
- Posee instrumentos virtuales de alto nivel para el control de las funciones de entrada/salida del sistema. Esta característica le hace especialmente indicado para aplicaciones orientadas a la instrumentación.
- Ofrece la posibilidad de comunicarse con otras aplicaciones mediante el uso de ActiveX. Esta propiedad será explotada ampliamente por nuestra aplicación, ya que nos comunicaremos con el programa matemático Matlab a la hora de realizar cálculos de mayor complejidad durante el procesamiento de los datos obtenidos por LabView.

7.2. Gestión del sistema completo

En esta sección nos centraremos en ofrecer un análisis detallado del módulo de adquisición de nuestro sistema multiespectral. La aplicación desarrollada deberá gestionar todos los componentes hardware ya especificados con el fin de garantizar una correcta sincronización entre todos ellos. Esta implementación requerirá el uso de las librerías facilitadas por los fabricantes, ya que deberemos

inicializar, configurar y controlar cada dispositivo desde nuestro entorno de programación LabView.

Este análisis quedará organizado en dos partes, acorde a la estructura de un instrumento virtual: diagrama de bloques y panel de control. En la siguiente subsección (7.2.1) abordaremos una descripción pormenorizada del diagrama de bloques de nuestra aplicación, mediante diagramas de flujo y nuestro propio código LabView. Por otra parte, en el apartado posterior (7.2.2) presentaremos la interfaz gráfica que hemos desarrollado.

7.2.1. Análisis detallado de la implementación LabView

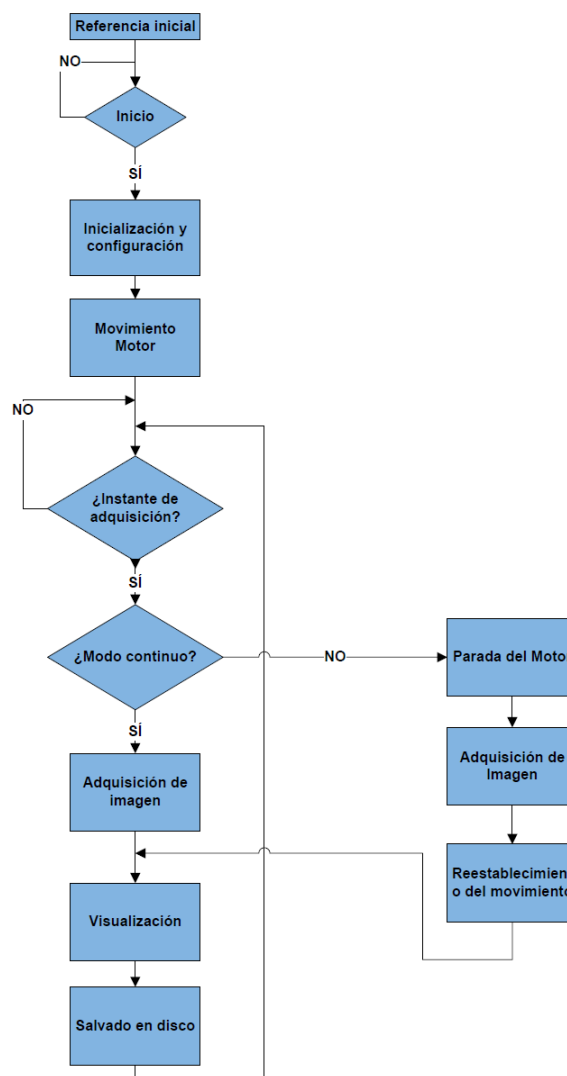
Nuestro sistema multiespectral tendrá como objetivo principal la sincronización del movimiento de la rueda portafiltros con la adquisición de la cámara infrarroja, de forma que la captura de imágenes se realice en el instante preciso en que los filtros seleccionados se encuentren delante del objetivo de la cámara. En líneas generales, y atendiendo al diagrama mostrado en la Figura 7.3, podemos hacernos una primera idea acerca de los pasos a seguir por nuestra aplicación:

- Referencia inicial. En todo sistema multiespectral será importante saber con qué filtro se corresponde la imagen adquirida. Para ello, deberemos de ser capaces de etiquetar de alguna forma cada una de éstas imágenes en base a una referencia fija que no sufra alteraciones de ningún tipo, bien por el propio uso o por su manipulación. Dicho esto, más adelante explicaremos la estrategia seguida para solventar este requerimiento.
- Después de obtener la referencia inicial, la aplicación quedará a la espera de que el usuario decida comenzar el proceso de adquisición. Una vez especificado, se procederá a la inicialización y configuración de la cámara infrarroja, el motor y la tarjeta de adquisición.
- Empleando la señal de salida de la electrónica de control deberemos detectar el instante en que alguno de los filtros interferenciales activos (seleccionados previamente via hardware) se encuentra justo delante de la óptica de la cámara. Una vez hecho esto, podremos adquirir la imagen correspondiente a ese instante.
- Una vez adquirida la imagen infrarroja, deberemos de salvar dicha imagen en disco ya que por limitaciones en memoria dinámica no podremos concatenar todas las imágenes obtenidas formando una sólo imagen multiespectral. Dado que guardaremos de forma independiente cada imagen,

posteriorme utilizaremos una rutina que nos permita aunar todas las imágenes resultado de la adquisición en una sólo imagen composición de todas ellas, que será mucho más indicada para un análisis posterior.

Figura 7.3: Diagrama de flujo general.

Diagrama de Flujo I



Tras este análisis un tanto intuitivo de nuestro modelo de adquisición, llevaremos a cabo a continuación una descripción pormenorizada de los diferentes bloques funcionales que participan en nuestro sistema, comentando a la vez los problemas que tratamos de afrontar con su diseño.

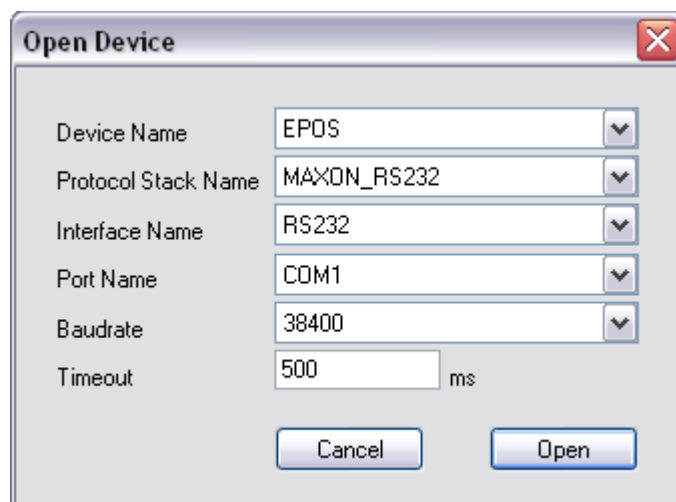
Referencia inicial

Primeramente, deberemos de configurar los parámetros necesarios para establecer la comunicación con el motor EPOS, por lo que emplearemos uno de los instrumentos virtuales que nos ofrece el fabricante. Dicho VI denominado *initialize.vi* pondrá a nuestra disposición la configuración de los parámetros más importantes, como podemos ver en la Figura 7.4. El significado de cada uno de ellos es el siguiente:

- *Device Name* es un simple identificador del motor que el usuario puede fácilmente interpretar.
- *Protocol Stack Name* hace referencia al tipo de protocolo de comunicación que vamos a utilizar. En nuestro caso podremos optar por el familiar protocolo RS-232 o por la especificación CAN (Controller Area Network). Debido al amplio uso, menor coste y disponibilidad emplearemos el protocolo RS-232, como ya explicamos en el apartado 5.1.
- *Interface Name* describe el tipo de interfaz de conexionado que vamos a utilizar, dado que el protocolo de comunicación escogido es RS-232, emplearemos también este tipo de interfaz.
- *Port Name* identifica el puerto RS-232 de nuestro ordenador que utilizaremos para esta conexión.
- *Baudrate* establece la tasa de transmisión en baudios² que emplearemos, esto es la velocidad de transmisión de la comunicación. Deberemos de seleccionar, tanto en el panel como en los parámetros de configuración de nuestro puerto, la misma tasa de transmisión.
- *Timeout* es el tiempo de espera definido en la comunicación. Se utiliza para poder detectar si una de las tramas enviadas no ha sido recibida correctamente.

²Cuando hablamos de velocidad en baudios nos referimos a la velocidad de transmisión expresada en función de los símbolos correspondientes a la modulación empleada.

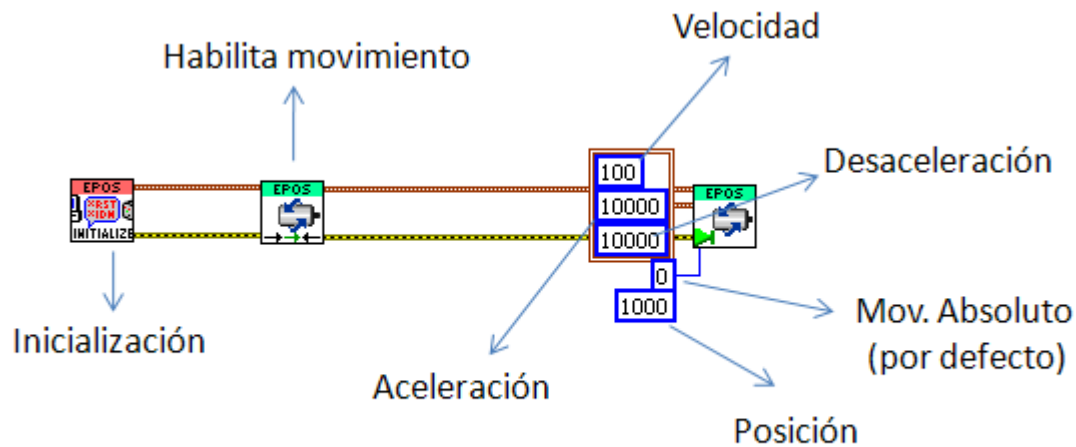
Figure 7.4: Comunicación con el motor EPOS.



Una vez establecida la comunicación con nuestro motor, necesitamos fijar una referencia válida para cada vez que utilicemos el sistema. Ante este problema, la solución más acertada consiste en etiquetar cada uno de los filtros en base a una posición de la rueda portafiltros con respecto a la óptica de la cámara, de forma que cada vez que inicialicemos la aplicación, el motor se posicione previamente en una posición preestablecida. Esta solución nos asegura que el orden de los filtros al pasar por el objetivo de la cámara no variará sea cual sea el resultado de operaciones anteriores.

En la Figura 7.5 podemos ver los elementos LabView empleados hasta este punto. Tras la inicialización nos valdremos de otro instrumento virtual que habilitará el movimiento del eje del motor (*EnableAxis.vi*). A continuación realizaremos un movimiento absoluto en el eje del motor hasta la posición de referencia fijada.

Figure 7.5: Inicialización y referencia.

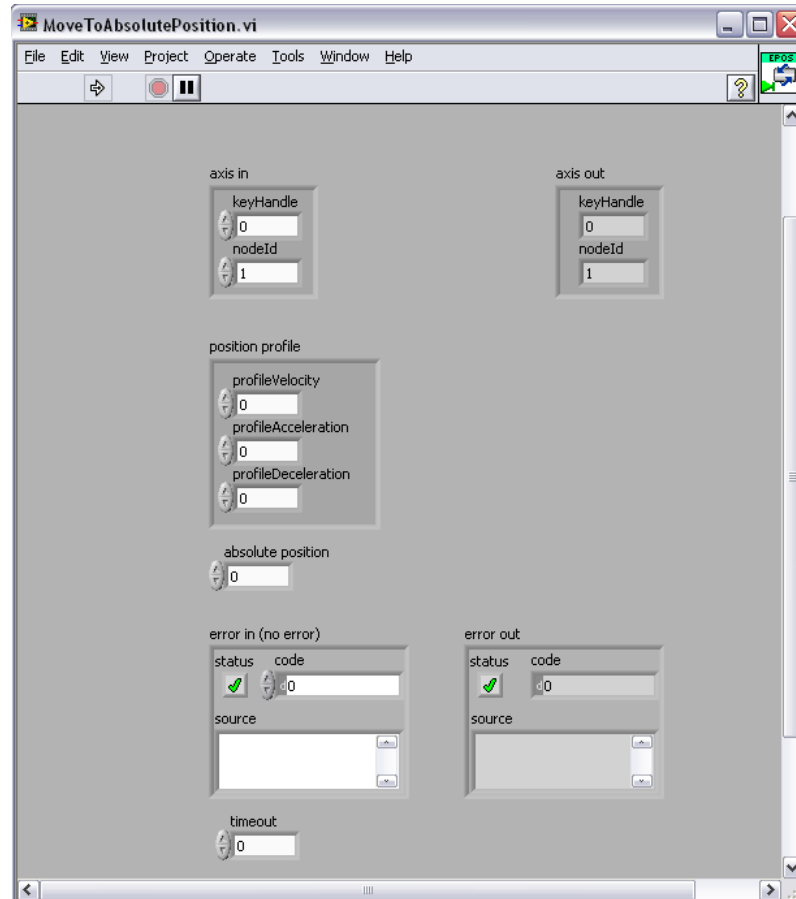


Para realizar movimientos absolutos utilizaremos nuevamente uno de los instrumentos virtuales del fabricante, en este caso *MoveToAbsolutePosition.vi*. En la Figura 7.6 podemos ver el panel frontal asociado a este VI, que se corresponde con los parámetros de entrada que deberemos proporcionar, y que también están representados en la Figura 7.5. Así tendremos que establecer valores para la aceleración, deceleración, velocidad de giro y posición absoluta. En el anterior esquema podemos ver como tanto la aceleración como la deceleración toman el valor más alto posible, esto es 10000 m/s^2 . La velocidad de giro la hemos fijado a 100 rpm y, a modo de ejemplo, la posición absoluta es 1000 (valor escogido al azar entre las 4000 posiciones que identifican una vuelta completa y que sólo dependerá de la posición de los filtros con respecto a la óptica de la cámara IR).

Seguidamente, la aplicación quedará a la espera de que el usuario decida comenzar la adquisición. Por defecto estará habilitado el modo filtro a filtro, en el que la velocidad del motor estará fijada internamente y el usuario no podrá modificarla desde la interfaz gráfica. Esto es debido a que, al parar la rueda portafiltros en cada una de las posiciones de los filtros interferenciales, se produce una pequeña oscilación o rebote como consecuencia de la inercia de la rueda. Más adelante trataremos este efecto, pero con el objetivo de reducir sus consecuencias utilizaremos velocidades no muy elevadas en este modo ($\leq 25 \text{ rpm}$). Este es el motivo por el cual el control de velocidad aparece deshabilitado en el modo filtro a filtro, como explicaremos en el apartado dedicado

a la interfaz gráfica.

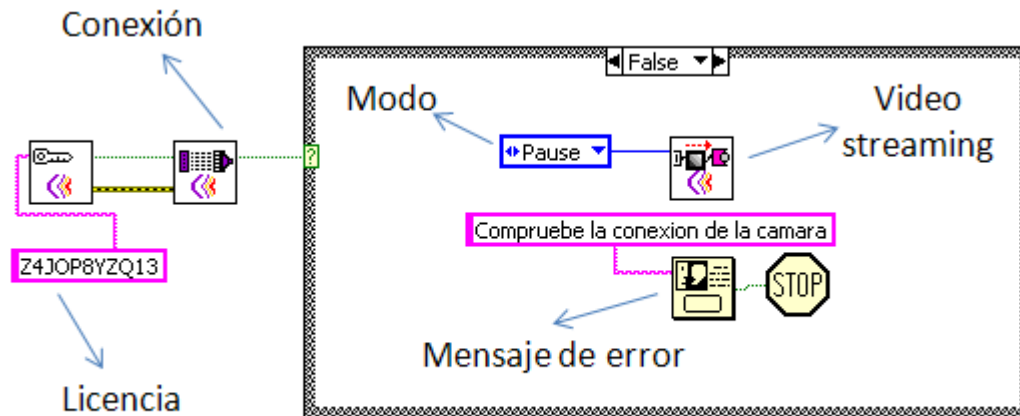
Figure 7.6: Instrumento para movimiento absoluto.



Inicialización y configuración de la cámara IR

Para la correcta inicialización de la cámara deberemos insertar primero el código con la licencia adjunto en la documentación de la cámara. Tras esto utilizaremos el instrumento *ConnectCamera.vi* para establecer la conexión. Y en el caso de que la conexión no llegara a realizarse se detendrá la actividad de la cámara y se mostrará un mensaje de error al usuario, como podemos ver en la Figura 7.7.

Figure 7.7: Inicialización de la camara IR.



Una vez hecho esto tendremos que configurar una serie de parámetros de funcionamiento, para lo que utilizaremos el instrumento *Camera_Parameter.vi*. En la Figura 7.8 podemos ver como hemos desactivado la opción de realizar un promediado sobre las imágenes obtenidas, aunque esta opción podría resultar interesante dependiendo del objetivo de nuestro experimento ya que produce una reducción en el nivel de ruido. Otro parámetro importante, especialmente para la visualización, es el ajuste de la ganancia de la cámara, donde hemos optado por la configuración automática. También podemos configurar otros parámetros como el nivel de contraste o la sensibilidad.

Ya configurado el dispositivo habilitaremos la actividad de adquisición de imágenes por medio del instrumento *VideoStreaming.vi*, al que pasaremos como parámetro la opción *Run*. Dicho instrumento nos permite la adquisición de imágenes de forma **asíncrona** por medio de los instrumentos *GetNextImage.vi* o *GetNextArray.vi*, que serán de gran utilidad posteriormente.

Figura 7.8: Configuración de la cámara IR.



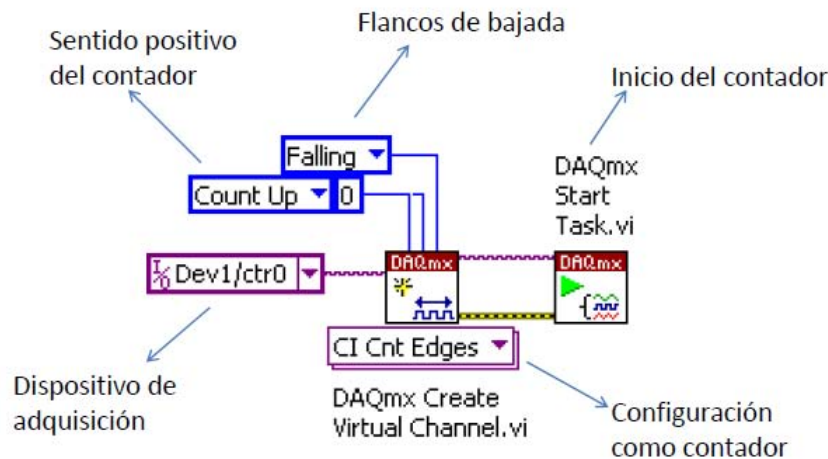
Inicialización del contador de la tarjeta de adquisición

Como ya hemos anunciado, nuestra tarjeta de adquisición NI-6501 cuenta con un registro contador que puede ser controlado a través de nuestra aplicación software gracias al módulo DAQmx de National Instruments. La electrónica de control nos proporcionará una señal TTL activa a nivel bajo, por lo que cuando uno de los filtros activos se encuentre delante del objetivo de la cámara tendremos un '0' lógico a la salida. Dicha transición de nivel alto a nivel bajo será detectada por la tarjeta, ya que se incrementará el valor del registro contador.

El primer paso será configurar correctamente el módulo DAQmx, para lo cual nos valdremos del instrumento virtual *DAQmx Create Virtual Channel.vi*. Dicho VI establece primero un canal virtual con el que accederemos al registro contador de nuestra tarjeta. Para ello deberemos de configurar este módulo de acuerdo a las especificaciones de la tarjeta de adquisición, por ejemplo, en nuestro caso no tenemos la posibilidad de detectar flancos de subida (transiciones de nivel bajo a nivel alto).

Estableceremos un canal virtual con la funcionalidad de contar flancos de señal, para lo que seleccionaremos la opción *CI Cnt Edges*. Además, deberemos especificar el sentido del contador (positivo en nuestro caso), la ubicación hardware del dispositivo (*Dev1/ctr0*) y la naturaleza de los flancos a detectar (*falling* en la Figura 7.9).

Figura 7.9: Configuración del módulo DAQmx.



Una vez configurado todo, sólo nos queda poner en marcha el módulo de

adquisición mediante el instrumento *DAQmx Start Task.vi*, que creará una nueva tarea encargada de gestionar el registro contador de acuerdo a nuestra configuración. Dicha tarea podrá ser pausada en cualquier momento de la ejecución y, del mismo modo, reanudada. Además deberá ser finalizada una vez terminemos la adquisición para evitar problemas derivados de la compartición de un mismo recurso al asignar el registro contador a tareas diferentes.

Visualización de la imagen IR

Una vez adquiramos la imagen IR, tendremos que encargarnos de su correcta visualización en la interfaz gráfica. Para ello contamos con el módulo NI IMAQ Vision, que llevará a cabo la gestión de memoria (reserva, utilización,...) necesaria y nos proporcionará herramientas que nos facilitarán enormemente la labor de visualización.

En primer lugar emplearemos el instrumento *IMAQ Create.vi*, donde como podemos ver en la Figura 7.10, habremos de especificar el tipo de datos que contendrá nuestra imagen así como un identificador. En nuestro caso, la cámara PV-320 emplea palabras de 16 bits de tipo entero sin signo.

A continuación, el instrumento *IMAQ SetImageSize.vi* reservará la memoria necesaria una vez le hayamos proporcionado las dimensiones de la imagen. En nuestro caso tendremos imágenes de 240 filas con 320 muestras por fila.

Figura 7.10: Inicialización de la imagen IR.



Bucle de adquisición

Una vez terminadas todas las tareas de inicialización y configuración descritas en los anteriores apartados, nuestra aplicación comenzará la adquisición de imágenes de forma continua mediante un bucle de adquisición.

En la Figura 7.11 podemos ver una representación en forma de diagrama de flujo del esquema de funcionamiento de esta parte de nuestra aplicación. En este punto podemos describir más a fondo una característica de nuestra implementación ya introducida, que es la posibilidad de utilización de dos modos de adquisición:

- *Modo filtro a filtro.* En este modo de funcionamiento realizaremos la adquisición de la imagen infrarroja una vez que el filtro interferencial se encuentre parado justo en frente de la óptica de la cámara. Para ello deberemos de parar el movimiento del motor previamente a la adquisición para después reanudar su marcha de nuevo.

Al realizar la parada del motor nuestra rueda portafiltros sufrirá una pequeña oscilación a modo de rebote que provocará que los fototransistores de la electrónica de control puedan ser de nuevo iluminados por los LED's. Esto se traduciría en una transición de nivel alto a nivel bajo y su correspondiente flanco de bajada, que será detectado por nuestro contador. Este hecho podrá generar situaciones de falsa alarma en las que nuestra aplicación detecte de forma equívoca la presencia de un filtro activo ante el objetivo de la lente.

Para solventar este problema, la alternativa que hemos planteado consiste en pausar la tarea encargada de contabilizar flancos de bajada inmediatamente después de parar la rueda portafiltros. Esta pausa será mantenida durante un periodo de guarda que hemos estimado de forma experimental en 200 ms , dado para una velocidad de la rueda de 15 rpm ya que si aumentáramos esta velocidad el tiempo de estabilización también aumentaría.

Durante este tiempo tendrán lugar las oscilaciones de mayor amplitud, pero para poder realizar la adquisición de la imagen es conveniente que la posición del filtro sea lo más estable posible, por lo que esperaremos igualmente otros 200 ms .

Una vez adquirida la imagen IR podremos reanudar el movimiento de la rueda y la actividad del detector de flancos.

- *Modo continuo.* La principal diferencia con el modo *Filtro a Filtro* es que la captura de la imagen tiene lugar paralelamente al giro de la rueda portafiltros. Es decir, el filtro interferencial sufrirá un movimiento relativo al objetivo de la cámara durante el tiempo empleado en la adquisición, esto es el tiempo de barrido del FPA de la cámara IR.

La implementación de este modo carece de los problemas de oscilaciones derivados de las paradas del motor, lo que nos lleva a una simplificación en la algorítmica de nuestra aplicación. Sin embargo, habremos de afrontar unos requerimientos de sincronización más altos que en el modo anterior, por lo que será importante reducir en la medida de lo posible las operaciones software.

Al contrario de lo que sucedía en el otro modo, en el modo *continuo* el usuario podrá seleccionar la velocidad de giro que desee, aunque la velocidad máxima permitida vendrá limitada por una serie de factores inherentes al sistema de adquisición.

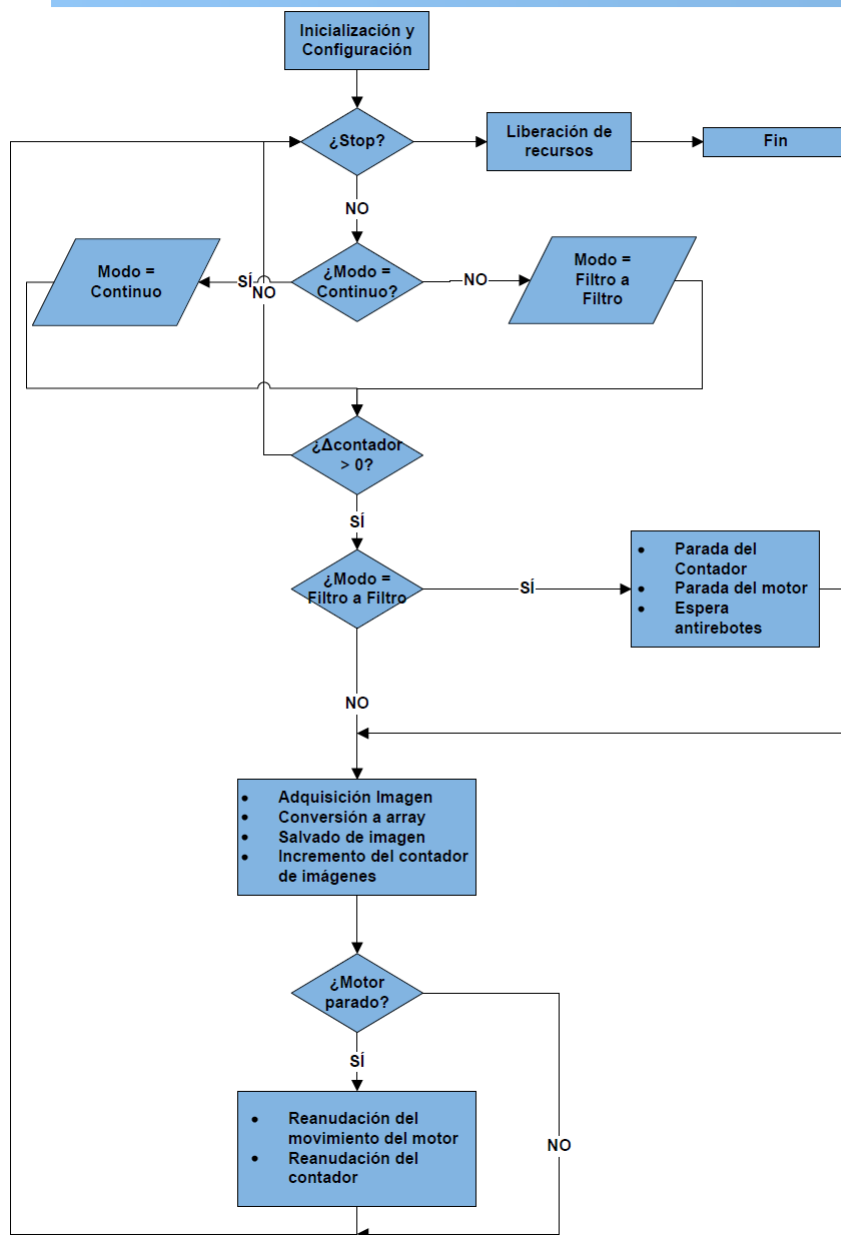
Idealmente, el tiempo entre imágenes sucesivas ($20ms$) de nuestra cámara PV-320 debería ser la única restricción de nuestro sistema. Sin embargo, y dado que la gestión del sistema completo es realizada mediante software, tendremos que tener también en cuenta el tiempo empleado en el resto de operaciones. En el apartado destinado a futuras mejoras trataremos de forma más amplia este problema y propondremos varias soluciones con el fin de incrementar la velocidad de nuestra implementación.

La primera operación que realizaremos en nuestro bucle de adquisición será comprobar si alguno de los filtros seleccionados se encuentra delante de la óptica de la cámara, lo que es equivalente a comprobar si se ha producido un flanco de bajada. Y, dado que hemos implementado un contador que incrementa su valor al producirse este tipo de cambios en la señal de control, una forma sencilla de detectar flancos será detectar incrementos en el valor del contador.

Por esto, tendremos que acceder, a intervalos de tiempo lo más pequeños posibles, al valor del registro contador de la tarjeta de adquisición. Al encontrarnos dentro de un bucle, lo más eficiente en términos temporales consiste en delegar las labores de temporización al propio sistema operativo, que es lo que precisamente hacemos cuando obviamos introducir elemento de temporización alguno.

Figura 7.11: Diagrama de flujo detallado.

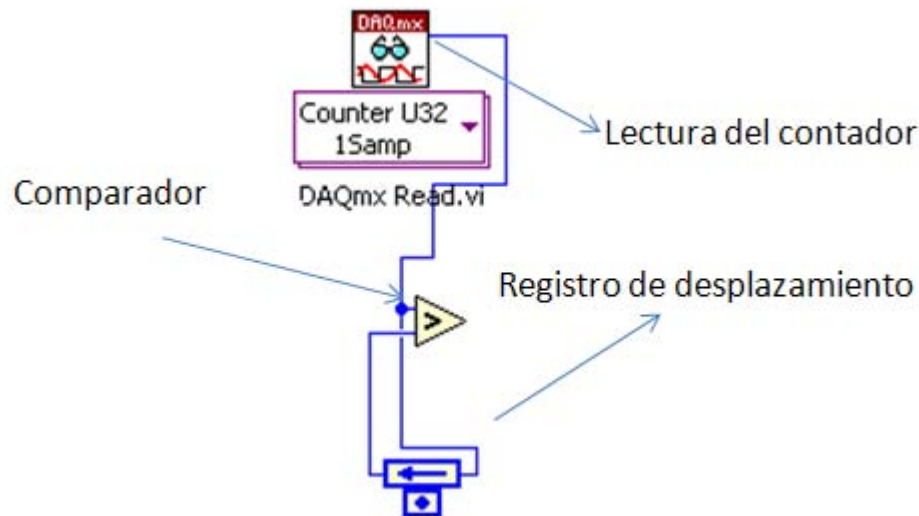
Diagrama de Flujo II



Para acceder al valor del contador emplearemos el instrumento *DAQmx Read.vi* ,

y posteriormente compararemos este valor con el obtenido en el instante anterior a través de un registro de desplazamiento como podemos ver en la Figura 7.12.

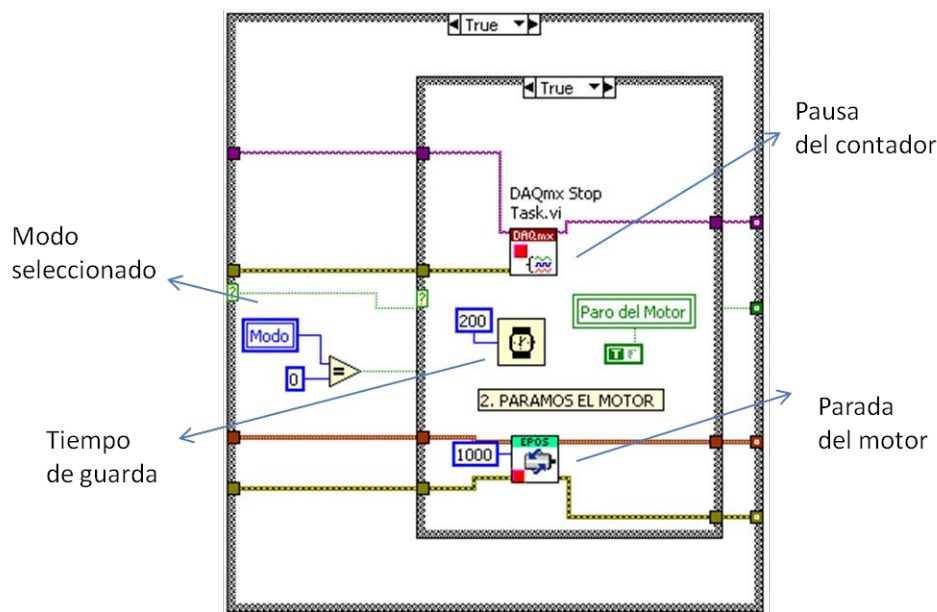
Figura 7.12: Código encargado de la detección de flancos.



En caso de que detectemos un incremento en el contador, tendremos que comprobar el modo de adquisición vigente en ese momento. Si nos encontramos en el modo continuo no será necesaria ninguna operación adicional previa a la adquisición IR. En cambio, en el modo filtro a filtro tendremos que realizar las tareas que pueden comprobarse en la Figura 7.13, todas ellas de forma paralela:

1. Parar el motor de la forma más rápida posible, por lo que seleccionamos la máxima deceleración permitida, $10000 \frac{m}{s^2}$.
2. Para evitar el problema de oscilaciones ya mencionado desactivaremos el contador de flancos mediante el instrumento *DAQmx Stop Task.vi*.
3. También tendremos que esperar el tiempo de guarda ya mencionado con el mismo fin de eliminar las oscilaciones en la medida de lo posible.

Figura 7.13: Código del bucle de adquisición.



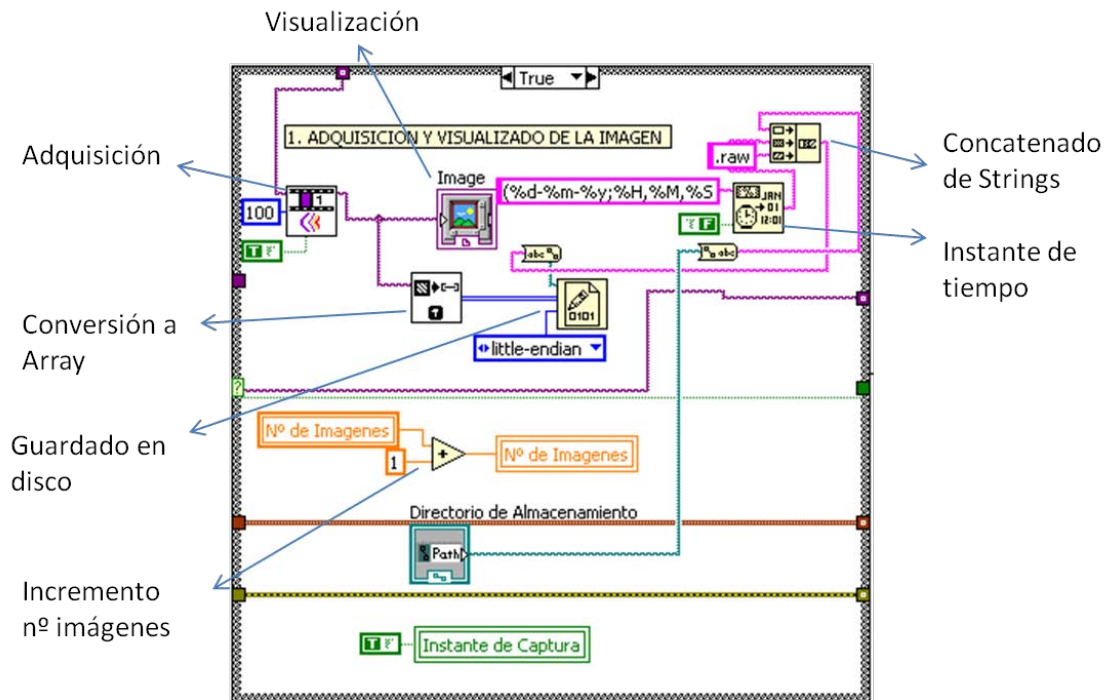
Adquisición y salvado de la imagen IR

Llegados a este punto, e independientemente del modo de adquisición en el que nos encontremos, llevaremos a cabo la adquisición de la imagen infrarroja. Mediante el instrumento virtual *GetNextImage.vi* obtendremos la imagen de la cámara tomando como punto de partida ese mismo instante. Dicha imagen podrá ser visualizada directamente por la interfaz gráfica como podemos ver en la Figura 7.14.

Una vez adquirida, la imagen será guardada en disco acto seguido y de forma independiente. Es decir, salvaremos las imágenes una a una conforme las adquiramos. El motivo de esta acción es la limitación en memoria dinámica de la que dispondrá nuestra aplicación, que es lo que nos impide concatenar una imagen tras otra formando una sola imagen multiespectral.

Para salvar las imágenes utilizaremos el instrumento virtual *WriteToBinaryFile.vi*, al que además deberemos especificar cual será el bit más significativo de acuerdo al sistema operativo en el que trabajemos. Tanto para plataformas Windows como Linux se emplea el orden denominado *little-endian*, en el que los bits menos significativos ocupan las menores posiciones de memoria.

Figura 7.14: Código de adquisición y salvado.

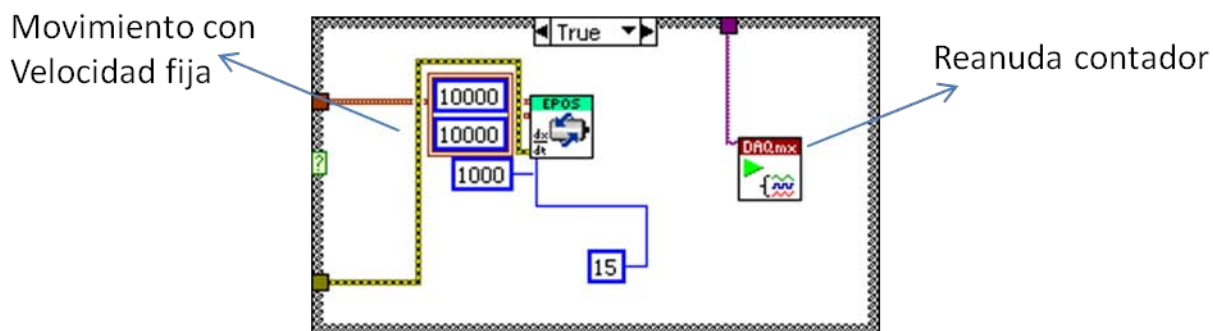


Reanudación de la adquisición

Este apartado será sólo susceptible de ejecución en el modo *filtro a filtro*, ya que en el modo *continuo* únicamente nos limitaremos a detectar flancos y proceder a la adquisición. En cambio, en el modo *filtro a filtro* deberemos reanudar tanto el movimiento del motor como la actividad del contador de flancos.

Como podemos ver en la Figura 7.15, emplearemos el instrumento *MoveWithVelocity.vi*, provisto en la librería del motor, para reanudar el movimiento de la rueda portafiltros a la velocidad prefijada de 15 rpm. Paralelamente a la reanudación de la marcha del motor, deberemos habilitar nuevamente el contador de flancos, para lo que utilizamos el VI *DAQmx Start Task.vi* de la misma forma que en su inicialización.

Figura 7.15: Reanudación del movimiento del motor.

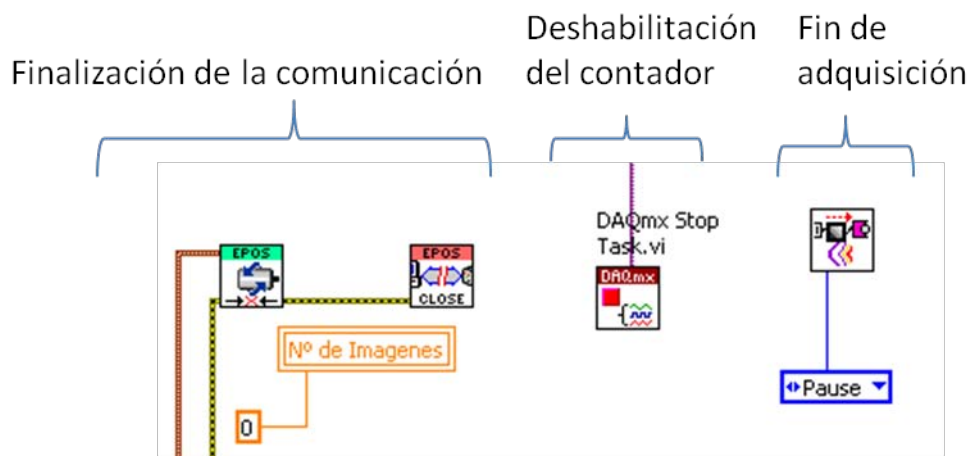


Liberación de recursos

Finalmente, una vez el usuario haya decidido finalizar la adquisición de imágenes, tendremos que deshabilitar y liberar los recursos empleados por nuestro sistema para evitar conflictos debidos a la compartición de recursos. Por esto finalizaremos la comunicación con el motor y la cámara IR, y a su vez deshabilitaremos el registro contador.

En la Figura 7.16 podemos ver el código LabVIEW encargado de todas las tareas descritas. Antes de finalizar la comunicación con el motor deberemos deshabilitar primero el movimiento de su eje, para lo que empleamos el instrumento *DisableAxis.vi*. A continuación emplearemos el instrumento *Close.vi* para romper definitivamente la comunicación.

Figura 7.16: Código de liberación de recursos.



En el caso de la cámara PV-320, simplemente deberemos de desactivar el *streaming* de vídeo mediante el instrumento ya utilizado *VideoStreaming.vi*.

Y, por último, en el caso de la deshabilitación del contador, emplearemos el instrumento *DAQmx Stop Task.vi* del que ya hicimos uso para solventar el problema de las oscilaciones.

7.2.2. Interfaz gráfica de la aplicación

Como hemos descrito en la introducción a LabView realizada al comienzo del capítulo, nuestra aplicación constará tanto de un diagrama de bloques como de un panel frontal. Una vez descritas las características funcionales realizadas en el diagrama de bloques, procederemos a la descripción de la interfaz gráfica asociada al panel frontal y que podemos ver en la Figura 7.17.

Dicha interfaz llevará a cabo principalmente dos tareas: la comunicación usuario-aplicación y la visualización de las imágenes obtenidas así como de otros datos de interés. Describiremos los elementos que la conforman a la vez que explicamos el procedimiento a seguir para la utilización de nuestro sistema.

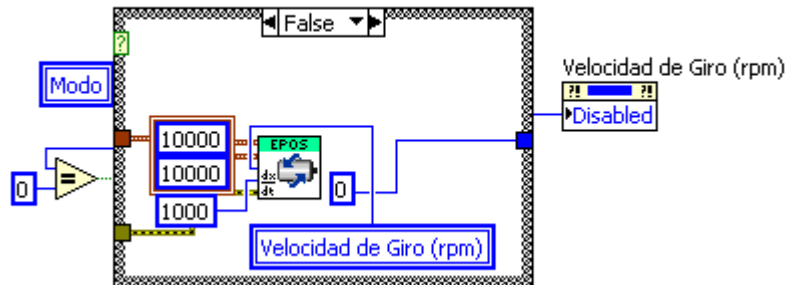
Figura 7.17: Panel frontal del sistema de adquisición.



En primer lugar, tendremos que ejecutar nuestra aplicación en el entorno LabView, momento a partir del cual comenzará la búsqueda de la referencia para el etiquetado de los filtros. Una vez fijada dicha referencia, se habilitará el botón “Comenzar” situado en la parte superior derecha de la Figura 7.17. El sistema de adquisición se mantendrá en un estado de espera que se prolongará hasta que el usuario decida comenzar la adquisición pulsando “Comenzar”. Durante dicho estado de espera, el usuario deberá configurar dos aspectos de la aplicación:

- Por un lado, el modo de adquisición (*filtro a filtro* o *continuo*) que desea emplear. Por defecto, la aplicación seleccionará el modo *filtro a filtro* en el que la velocidad de movimiento vendrá prefijada a 15 *rpm*. De todas formas, es posible cambiar el modo de adquisición en cualquier instante de la ejecución, lo que aporta una mayor flexibilidad al usuario. Esto se consigue mediante la consulta del modo seleccionado en cada iteración del bucle de adquisición.

Figura 7.18: Consulta del modo de adquisición.



Como podemos ver en la Figura 7.18, también podremos ajustar en tiempo real de ejecución la velocidad de giro de la rueda portafiltros, utilizando el *scroll* ubicado justo al lado de la elección del modo de adquisición. Para ello, emplearemos el instrumento ya conocido *MoveWithVelocity.vi*, en el que la velocidad de giro se convertirá en una nueva variable del sistema.

- Por otro lado, el usuario deberá seleccionar el directorio en el que se almacenarán todas las imágenes obtenidas. Para esto dispone en la parte inferior izquierda de un explorador emergente en el que podrá navegar hasta la carpeta en la que desee guardar toda la información adquirida. En la Figura 7.19 podemos ver un ejemplo de selección de directorio de trabajo.

En la interfaz gráfica también dispondremos de información acerca del número de imágenes adquiridas. Además, existen dos indicadores en forma de LED que nos indican tanto el tiempo durante el que se realiza la adquisición, como el tiempo durante el cual el motor se encuentra parado.

Figura 7.19: Diálogo de selección de directorio.



Por último, la adquisición terminará en caso de que se pulse el botón de “*Stop*” situado en la parte superior derecha. En ese momento las imágenes adquiridas ya se encontrarán salvadas en el directorio de trabajo seleccionado y la rueda portafiltros se detendrá, liberándose a su vez todos los recursos empleados.

Parte III

PROCESADO DIGITAL MULTIESPECTRAL

Capítulo 8

Análisis de componentes principales

8.1. Introducción

Una práctica habitual en la descripción estadística de un cierto fenómeno consiste en seleccionar el mayor número posible de variables, especialmente si no sabemos demasiado sobre los datos obtenidos o si nuestro estudio sólo tiene un carácter exploratorio o superficial. Esta técnica puede ocasionar una elevada complejidad en su posterior análisis ya que si por ejemplo tomamos 10 variables, tendremos que calcular 45 coeficientes de correlación ¹, aumentando su número de forma factorial con las variables seleccionadas. Además, un elevado número de variables puede dificultar en gran medida su correcta interpretación, por lo que se nos hace más difícil poder discernir qué cantidad de información es aportada por cada una de ellas al incrementar el número de éstas.

A la vista de estas complicaciones, el análisis por componentes principales tiene como objetivo representar la mayor cantidad de información con el menor número de nuevas variables, que serán construidas en base a una transformación de las variables originales. Por ejemplo, en el caso de variables con alta dependencia es frecuente que un reducido número de ellas (usualmente menos del 20 % de las originales) aporte la mayor parte de información del problema (más del 80 %) [7].

La técnica de análisis por componentes principales es debida al estadístico norteamericano Harold Hotelling, en torno al año 1933, aunque sus orígenes se

¹El número de coeficientes viene dado por $\binom{10}{2} = \frac{10!}{2! \cdot 8!} = 45$.

remontan a los ajustes ortogonales por mínimos cuadrados desarrollados por Karl Pearson, uno de los fundadores de la estadística en el siglo XIX, en 1901 [7].

El empleo de componentes principales nos proveerá de una doble funcionalidad:

- Por un lado, nos permite representar de forma óptima en un espacio de dimensión pequeña observaciones provenientes de un espacio de dimensión mayor. Esto nos facilita la identificación de aquellas variables latentes, no observadas, que generan los datos.
- Por otro, permite transformar las variables originales, por lo general correladas en cierto grado, en nuevas variables incorreladas, lo que facilita la interpretación de los datos.

En el análisis de los datos proporcionados por un sistema multiespectral, contaremos con tantas variables como longitudes de onda hayamos seleccionado para el experimento. En este sentido, nuestro sistema de adquisición en particular podrá obtener un máximo de siete variables, debido a que contamos con siete filtros interferenciales.

8.2. Planteamiento del problema

Más específicamente, enunciaremos el objetivo de esta técnica de la siguiente forma [7]:

Definición. *El análisis de componentes principales consiste en encontrar transformaciones ortogonales de las variables originales para conseguir un nuevo conjunto de variables incorreladas, denominadas componentes principales, que se enuncian en orden decreciente de importancia.*

Las componentes son combinaciones lineales de las variables originales, y son calculadas de forma que solo unas pocas recojan la mayor parte de la variabilidad de los datos. De esta forma, eligiendo sólo las primeras se logra una reducción de la dimensión de los datos que simplifica el problema en estudio.

A partir de este momento consideraremos la matriz X de dimensiones $n \times p$, donde p es el número de variables originales, cada una de ellas con n muestras. De esta forma, la transformación llevada a cabo puede considerarse una rotación en el espacio p -dimensional, donde las q primeras componentes generarán un subespacio vectorial de dimensión q .

Cuando el valor de q es pequeño, como por ejemplo 2, es fácil interpretar y representar de forma gráfica las muestras en este subespacio. Así, el análisis por componentes principales también puede entenderse cómo la búsqueda del subespacio de mejor ajuste a los datos.

En función de sus múltiples interpretaciones, son también múltiples los métodos alternativos de los que disponemos para llevar a cabo el cálculo de las componentes principales, como a continuación exponemos:

- Dado que las nuevas variables no son más que una combinación lineal de las originales, el algoritmo original se basa en encontrar aquellas combinaciones lineales para las que se **maximiza la variabilidad**.
- Como hemos anticipado, otra opción consiste en buscar el subespacio que mejor se ajuste empleando el criterio MMSE (*Minimum Mean Square Error*). Dicho criterio buscará minimizar la suma de los cuadrados de las distancias de cada punto al subespacio.
- Otra forma posible consiste en minimizar la discrepancia entre las distancias euclídeas entre los puntos calculadas en el espacio original y en el subespacio de baja dimensión.
- Por último, podríamos hacer uso de los métodos Biplot, que emplean regresiones alternadas [9].

8.3. Cálculo de las componentes

En esta sección llevaremos a cabo el desarrollo matemático [7] que proporcionará la obtención de las componentes principales mediante la maximización de la variabilidad. Dicho método resulta el más intuitivo de los expuestos y es el más fácilmente encontrado en la literatura. El desarrollo será necesario posteriormente, a la hora de implementar esta técnica de forma eficiente en nuestra aplicación.

Dicho esto, denotaremos con X_1, X_2, \dots, X_p a las variables originales y con Y_1, Y_2, \dots, Y_p a las componentes; donde, en principio, podremos tener tantas componentes como variables originales, aunque posteriormente podremos optar por reducir su número a costa de una pérdida de información que deberemos valorar.

Como ya hemos descrito, X será la matriz correspondiente a los datos originales. Pero, en este caso, también habremos de imponer que dicha matriz

sea centrada por columnas, es decir, tendremos que sustraer su media previamente. La matriz S es la matriz de las covarianzas entre las variables, dada por la expresión:

$$S = \frac{1}{n-1} X^T X \quad (8.3.1)$$

Ahora, busquemos combinaciones lineales de las variables observadas de varianzas progresivamente decrecientes y a su vez incorreladas entre sí:

$$Y_j = v_{1j} \cdot X_1 + \dots + v_{pj} \cdot X_p \quad (8.3.2)$$

$$Y_j = X \cdot \mathbf{v}_j \quad (8.3.3)$$

$$Y = X \cdot V \quad (8.3.4)$$

Donde Y es la matriz que contiene los valores de las muestras originales sobre las componentes, y V es la matriz con los coeficientes empleados en la combinación lineal. Dado que en la definición hemos impuesto el carácter decreciente de la variabilidad, Y_1 contendrá la mayor parte de la varianza, Y_2 ha de ser ortogonal a Y_1 y su vez contener parte de la varianza restante, y así sucesivamente.

Una vez definidos los elementos involucrados, impondremos las condiciones necesarias para cumplir las especificaciones deseadas. Para ello, primeramente deberemos de limitar los coeficientes de la transformación lineal como sigue, para que sean ortonormales:

$$\sum_{k=1}^P v_{kj}^2 = 1 \quad \mathbf{v}_j^T \cdot \mathbf{v}_j = 1 \quad V^T \cdot V = I \quad (8.3.5)$$

A continuación, tenemos que buscar \mathbf{v}_1 tal que maximice la varianza:

$$Var(Y_1) = Var(X \cdot \mathbf{v}_1) = \mathbf{v}_1^T \cdot S \cdot \mathbf{v}_1 \quad (8.3.6)$$

por lo que utilizaremos el método de los multiplicadores de Lagrange que podemos consultar en [7], obteniendo:

$$S \cdot \mathbf{v}_1 = \lambda_1 \cdot \mathbf{v}_1 \quad (8.3.7)$$

De esta última expresión obtenemos que \mathbf{v}_1 será un autovector de la matriz de covarianzas S de autovalor asociado λ .

Con este procedimiento ya habríamos obtenido la primera de las componentes. Ahora, al proseguir el cálculo para la segunda componente deberemos de imponer como restricción adicional que ambas componentes sean ortogonales, esto es:

$$\text{cov}(Y_1, Y_2) = \mathbf{v}_2 \cdot S \cdot \mathbf{v}_1 \quad (8.3.8)$$

Tras esto, el procedimiento a seguir sería idéntico al de la primera componente, y el resultado a su vez análogo:

$$S \cdot \mathbf{v}_2 = \lambda_2 \cdot \mathbf{v}_2 \quad (8.3.9)$$

Una vez hemos calculado las dos primeras componentes, y dado que ya no tenemos que imponer más restricciones a nuestro modelo, estaremos en condiciones de enunciar una generalización del algoritmo aplicable a todas las componentes. Esta generalización tendrá como punto de partida la descomposición de S en sus autovalores y autovectores:

$$S = V^T \cdot \Lambda \cdot V \quad (8.3.10)$$

donde se cumple que:

- $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$
- $V^T \cdot V = I$

siendo V la matriz formada por los autovectores de S y Λ la matriz diagonal con sus autovalores, por lo que las nuevas variables estarán relacionadas con las originales mediante la transformación lineal dada por la proyección:

$$Y = X \cdot V \quad (8.3.11)$$

donde Y será la matriz que contenga en sus columnas las componentes principales deseadas, asociadas a la matriz original X y mediante el empleo de los autovectores de la matriz de covarianza S .

Una vez definidas las nuevas componentes, el valor de los autovalores nos aporta información acerca de, por ejemplo, la proporción de varianza absorbida por cada componente:

$$P_{\text{var},j} = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^P \lambda_i} \quad (8.3.12)$$

La expresión anterior puede ser generalizada para obtener la varianza absorbida por un subespacio de dimensión q como sigue:

$$P_{var,q} = \frac{\sum_{j=1}^q \lambda_j}{\sum_{i=1}^P \lambda_i} \quad (8.3.13)$$

Capítulo 9

Componentes principales en tiempo real

9.1. Introducción

Una vez descritos en el capítulo anterior los fundamentos básicos del análisis por componentes principales, abordaremos el proceso de cálculo de dichas componentes de forma paralela a la adquisición de imágenes. Nuestra aplicación de procesamiento estará pues relacionada con las funciones de adquisición, de las que hará uso, y será desarrollada en dos entornos de programación diferentes, LabView y Matlab. En el diagrama dispuesto en la Figura 9.1 podemos ver la estructura de nuestra aplicación y los elementos que la componen.

El cálculo de componentes principales conlleva la realización de una gran cantidad de operaciones (multiplicación de matrices, descomposición en autovectores y autovalores,...) que ponen de manifiesto la poca eficiencia de LabView en este ámbito. En nuestro caso esta falta de eficiencia nos repercute todavía más debido a los altos requerimientos temporales que precisamos, dado que el análisis se lleva a cabo de forma paralela a la adquisición, por lo que necesitamos otra plataforma en la que realizar estas operaciones.

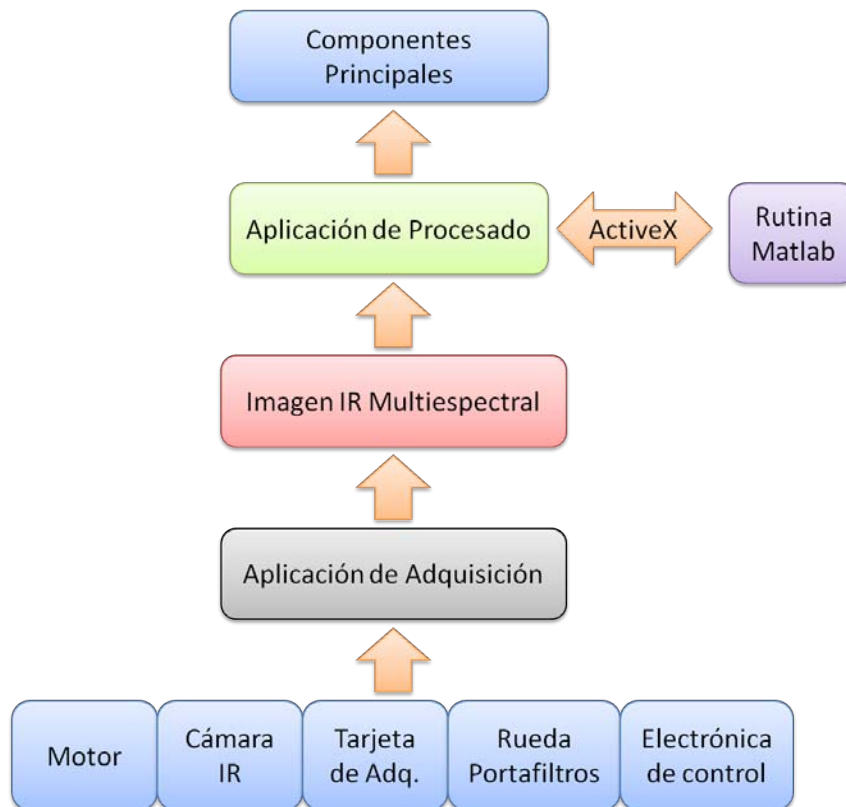
Debido a esto, hemos seleccionado Matlab como el entorno más adecuado por la gran eficiencia que nos ofrece para todo tipo de operaciones matemáticas, especialmente en las relacionadas con la manipulación de arrays de tamaños relativamente altos, como es nuestro caso. Esta eficiencia compensa en gran medida el incremento de complejidad en la estructura de la aplicación, debida a las labores adicionales de comunicación entre ambos entornos.

En la Figura 9.1 podemos ver además las relaciones funcionales entre los

elementos que conforman nuestra aplicación. En la base del diagrama se encuentran los elementos hardware que ya formaban parte de nuestro sistema de adquisición, y que igualmente deberán ser gestionados y sincronizados para obtener las imágenes IR. Dichas imágenes estarán originadas cada una de ellas por un filtro diferente de la rueda portafiltros, por lo que la composición de todas ellas resultará en una imagen multispectral con diferentes longitudes de onda. Posteriormente, la aplicación de procesamiento identificará cada longitud de onda con una variable distinta, y los puntos de cada imagen asociada compondrán los datos o muestras de cada variable.

Una vez dispongamos de una imagen multispectral, y tengamos claro sobre qué conjunto de datos aplicaremos el análisis de componente principales, relegaremos las labores de cálculo de componentes a una rutina Matlab. Dicha rutina devolverá las componentes principales a nuestra aplicación LabView de procesamiento, que se encargará de su visualización.

Figura 9.1: Diagrama del cálculo de componentes principales.



9.2. ¿Qué componente principal seleccionar?

Tras realizar el cálculo de componentes principales, lo ideal sería seleccionar aquella componente o componentes que realmente nos aporten información adicional de nuestro experimento. Por lo que, a priori, tendríamos que representar todas las componentes para así poder dilucidar cuál o cuáles de ellas tiene mayor relevancia para nuestro análisis.

Sin embargo, a la hora de visualizar los resultados por pantalla el espacio del que disponemos es limitado y sería deseable seleccionar a priori la componente que más información nos aporte. Dado que los experimentos que llevaremos a cabo emplearán sólo dos filtros interferenciales, la primera componente principal constituirá aproximadamente una media ponderada de los valores de ambos filtros. Mientras tanto, la segunda componente empleará la información de ambas bandas para proporcionarnos un nuevo escenario que nos será de gran utilidad para tareas de clasificación, como veremos en el capítulo 10 dedicado a los experimentos realizados, por lo que sería deseable que ésta última sí fuera visualizada en detrimento de la primera componente que casi no nos aporta información.

Antes de proceder a la descripción detallada, hemos de señalar que el sistema de procesamiento que describiremos únicamente empleará dos bandas diferentes, esto es, dos filtros interferenciales de los siete posibles. Dado que, como veremos durante el análisis, la generalización a un número de bandas mayor es inmediata, emplear únicamente dos de ellas nos servirá para ilustrar con mayor claridad y simplicidad el trabajo desarrollado.

9.3. Componentes principales en LabView

Tal y como puede observarse en la Figura 9.1, nuestra aplicación deberá llevar a cabo las labores de adquisición, obtención de la imagen IR, procesamiento y visualización. Sin embargo, el procesamiento será realizado sólo de forma parcial, ya que nuestra aplicación únicamente deberá gestionar y proveer de datos a una función Matlab que será la que realmente nos proporcione las componentes principales deseadas.

Como en toda aplicación LabView, en el programa desarrollado distinguiremos su interfaz gráfica (panel frontal) de su funcionalidad (diagrama de bloques). Así pues, en primer lugar describiremos todas las operaciones llevadas a cabo por nuestra aplicación y, posteriormente, presentaremos la interfaz gráfica desarrollada.

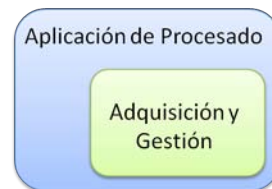
9.3.1. Diagrama de bloques

Para el cálculo de componentes principales, deberemos en primer lugar adquirir las imágenes correspondientes a las bandas espectrales seleccionadas (hasta un máximo de siete). Seguiremos pues requiriendo las labores de sincronización y gestión de todos los elementos necesarios para la adquisición. De esta forma, mantendremos la estructura básica de nuestro sistema de adquisición ya desarrollado añadiendo las modificaciones pertinentes para la nueva funcionalidad, que pueden englobarse en:

- Labores de almacenamiento de las imágenes de forma previa a su procesamiento. Donde, a modo de *buffer* deberemos de esperar hasta que todas las imágenes deseadas se encuentren disponibles para su procesamiento.
- Labores de comunicación con el entorno Matlab, donde se encontrará la función encargada del cálculo de las componentes principales.

Acorde con lo expuesto, nuestra aplicación de cálculo de componentes principales puede entenderse como una función de nivel superior que se vale de los resultados obtenidos por la función de más bajo nivel encargada de la adquisición, como podemos ver en la Figura 9.2.

Figura 9.2: Relación entre las aplicaciones desarrolladas.



Buffer de imágenes

El análisis de componentes principales nos exige disponer de tantas imágenes como bandas hayamos seleccionado, motivo por el cual deberemos almacenar las imágenes adquiridas hasta disponer de una imagen por banda. La estructura de datos seleccionada para esta labor condicionará el modo de comunicarnos con la aplicación Matlab y, afectará a los requerimientos de velocidad del sistema completo.

Son muchas las posibles opciones entre las que podemos elegir nuestra solución. En líneas generales podrían clasificarse en función del tipo de memoria que empleen para el almacenamiento:

- A través del disco duro. Dicha solución consistiría en almacenar en el disco duro del ordenador las imágenes adquiridas, de forma que la aplicación Matlab realice un nuevo acceso a disco por cada una de las imágenes en el momento del procesado. Además, deberemos de tener en cuenta qué formato emplea LabView al salvar nuestros datos en disco. En nuestro caso, LabView antepone una cabecera de longitud variable al resto de datos de la imagen, por lo que la aplicación Matlab tendrá que detectar dicha cabecera, lo que aumenta en cierta medida su complejidad.
- A través de memoria RAM. Dentro de este tipo son múltiples las opciones de las que disponemos en el entorno LabView. Abarcan desde simples estructuras, basadas en variables locales o en concatenamiento de arrays, hasta estructuras de datos más complejas como colas de datos.

Emplearemos un almacenamiento basado en memoria RAM debido tanto a la alta ineficiencia en los accesos a disco como al aumento de complejidad de la aplicación Matlab presentaría con la otra solución. Además, emplearemos como estructura de datos una variable local por cada una de las bandas a analizar.

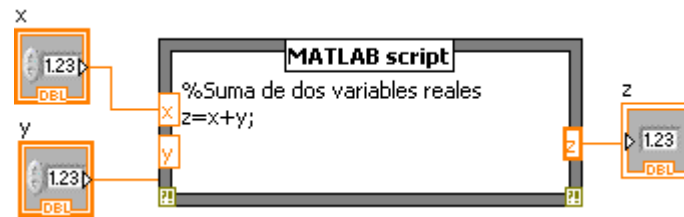
Comunicación con Matlab

Una vez dispongamos de las imágenes correspondientes a todas las bandas sobre las que deseamos realizar el análisis, tendremos que invocar a la función Matlab encargada de realizar los cálculos. Para ello emplearemos el instrumento virtual **Matlab Script** que LabView pone a nuestra disposición.

Gracias a este instrumento y mediante el uso de la tecnología ActiveX¹ podremos hacer uso de todas las posibilidades que Matlab nos ofrece. Esta herramienta emula un script de Matlab, en el que se ejecutarán de forma secuencial todas las instrucciones Matlab que añadamos. Dichas instrucciones podrán emplear todas las funciones que normalmente son empleadas, desde las más comunes hasta las desarrolladas por nosotros mismos en ficheros .m.

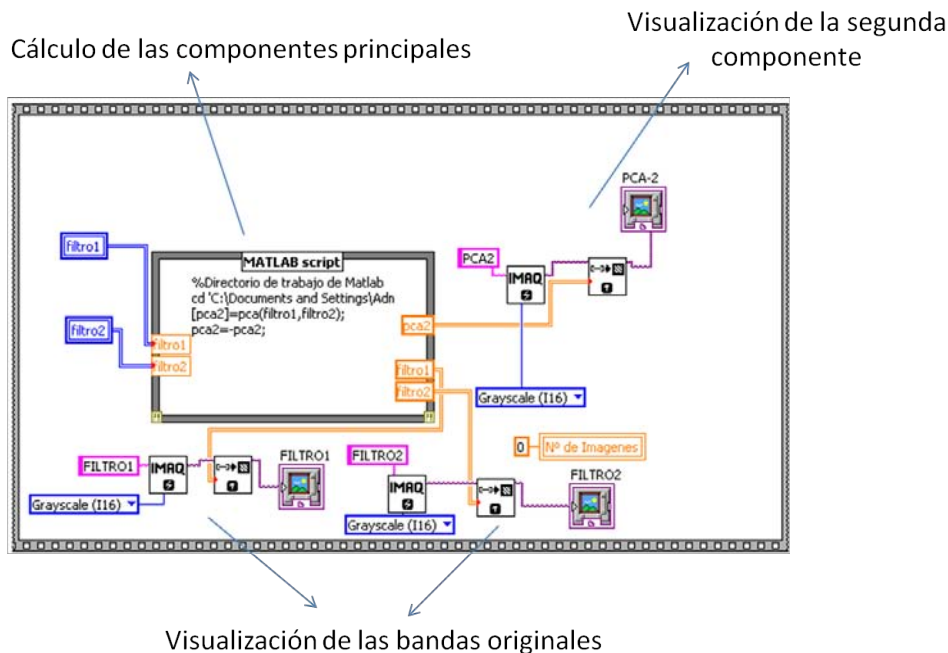
¹ActiveX es la denominación genérica de un conjunto de tecnologías desarrolladas por Microsoft, que nos permitan reutilizar código y conectar varias aplicaciones en un entorno común. Se basa en las tecnologías COM (*Component Object Model*), con origen en la anterior tecnología OLE (*Object Linking and Embedding*).

Figura 9.3: Ejemplo de Matlab Script en LabView.



En la Figura 9.3 podemos ver un ejemplo de su utilización mediante una aplicación simple que lleva a cabo la suma de dos números reales. A la izquierda del script, tendremos la posibilidad de insertar variables de entrada de nuestra aplicación LabView (x e y en la figura), para ello tendremos que definir también el tipo de datos que representarán en el script. De la misma forma, en la parte derecha podremos definir variables de salida (z en la figura), lo que nos permitirá el acceso a los resultados obtenidos por las operaciones llevadas a cabo en el entorno Matlab.

Figura 9.4: Comunicación con Matlab y visualización.



En nuestra aplicación emplearemos la herramienta Matlab Script para co-

municarnos con nuestra aplicación Matlab de cálculo de componentes principales, como podemos ver en la Figura 9.4.

Al emplear únicamente dos bandas espectrales diferentes, definiremos dos entradas en el script (*filtro1* y *filtro2*) que representarán las imágenes correspondientes a dichas bandas, por lo que serán arrays de dos dimensiones.

Dentro del **Matlab Script** invocaremos a la función que realiza el cálculo de componentes principales, cuyo nombre es *pca* y que será descrita en la siguiente sección (9.4). Esta función toma como variables de entrada las imágenes obtenidas por los dos filtros, pudiéndose generalizar fácilmente a n bandas, y devolviéndonos en este caso la segunda componente del análisis, aunque igualmente podrían obtenerse todas ellas. Para poder invocar a dicha función, primero deberemos indicar a Matlab el directorio en el que deberá buscar las funciones externas que desarrollemos, donde se encontrará el archivo *pca.m*. Para ello, y en la primera línea del script, haremos uso de la instrucción *cd* (*Change Directory*) seguida del nombre del directorio de trabajo utilizado.

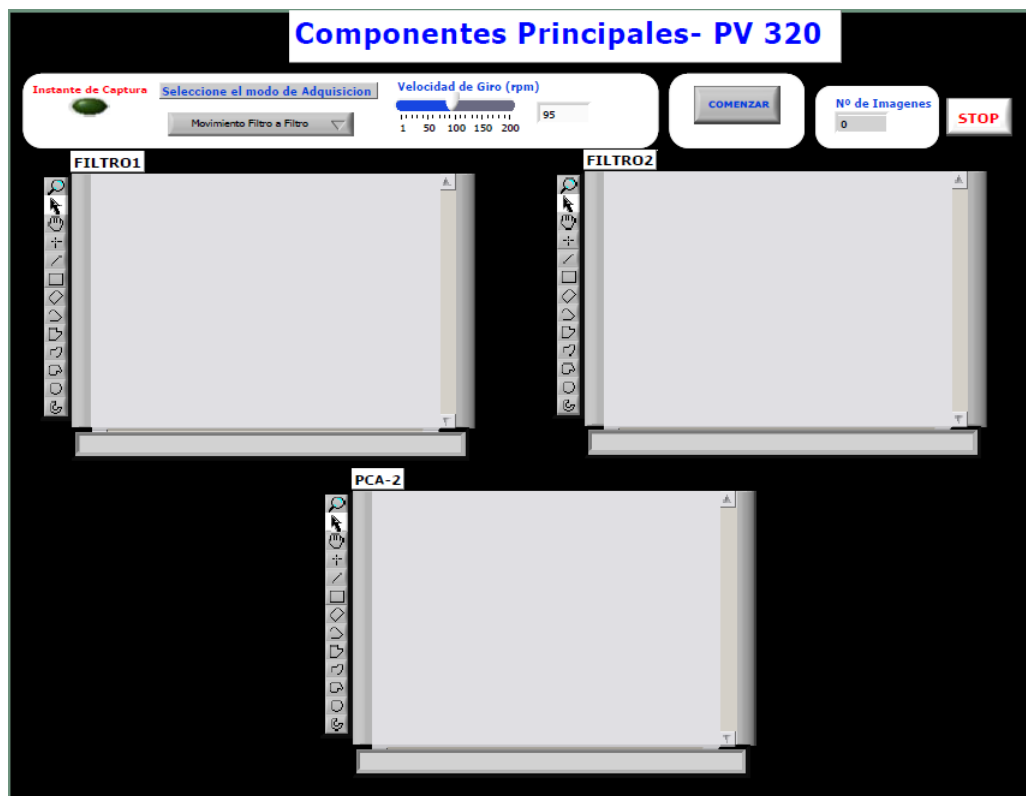
Una vez hecho esto, ya estaremos en disposición de ejecutar nuestra función de cálculo de componentes principales. Tras lo cual, únicamente cambiamos el signo de nuestro resultado para que pueda ser comparado con el de otras aplicaciones comerciales (como por ejemplo *ENVI*). Este cambio de signo no afecta al significado de la componente principal, sino que puede entenderse como un mero cambio en el sentido del vector director formado por los autovectores obtenidos, conservándose así su dirección, que es lo que realmente tiene importancia para nosotros.

Finalmente, una vez obtenida la segunda componente principal, llevaremos a cabo la visualización tanto de ésta última como de las imágenes originales. Así, podremos ver en pantalla al mismo instante toda la información de la que disponemos, por lo que será más fácil su interpretación.

9.3.2. Panel frontal

Una vez descritos los elementos funcionales, trataremos ahora la interfaz gráfica de nuestra aplicación de procesado. Su aspecto es muy similar al de la aplicación de adquisición, con la salvedad de que introduce más ventanas de visualización, una para cada uno de los filtros y otra más para su segunda componente principal.

Figura 9.5: Interfaz gráfica para dos filtros interferenciales.



9.4. Componentes principales en Matlab

Como ya hemos mencionado, la obtención de las componentes principales será llevada a cabo por una función Matlab. Esto es debido a que Matlab es mucho más eficiente que Labview en cuanto a cálculos con arrays se refiere, ya que su arquitectura interna está diseñada y optimizada precisamente para este tipo de operaciones. Antes del cálculo de dichas componentes, deberemos de realizar algunas operaciones que podemos considerar de “acondicionamiento” y que implican la manipulación de arrays bidimensionales, razón por la cual hemos escogido que sean llevadas a cabo en el entorno Matlab, en detrimento de LabView.

A lo largo de esta sección, describiremos todas las operaciones necesarias para el cálculo de las componentes principales. Analizaremos la función *pca*, que cuenta con la siguiente estructura funcional:

- Tras obtener las imágenes, éstas deben de ser previamente manipuladas para que puedan ser tratadas por nuestra función de cálculo de componentes principales. Esto es lo que previamente denominábamos “acondicionamiento”.
- Procederemos a continuación al cálculo de las componentes principales invocando a la función *componentes_principales*, que nos devolverá el conjunto de autovalores, autovectores y la proyección de nuestros datos sobre estos últimos.
- Ya que contamos con toda la información necesaria, sólo debemos seleccionar la componente (o componentes) principal(es) que deseemos. En nuestro caso seleccionamos la segunda componente y procedemos de nuevo a su “acondicionamiento” para que pueda ser correctamente visualizada.

Acondicionamiento previo

Las imágenes correspondientes a cada uno de los filtros forman arrays bidimensionales de tamaño 240×320 , mientras que nuestra función de cálculo de componentes principales requiere una matriz en la que cada una de las columnas represente una variable, y las muestras asociadas a esa variable queden dispuestas a lo largo de las filas de la matriz.

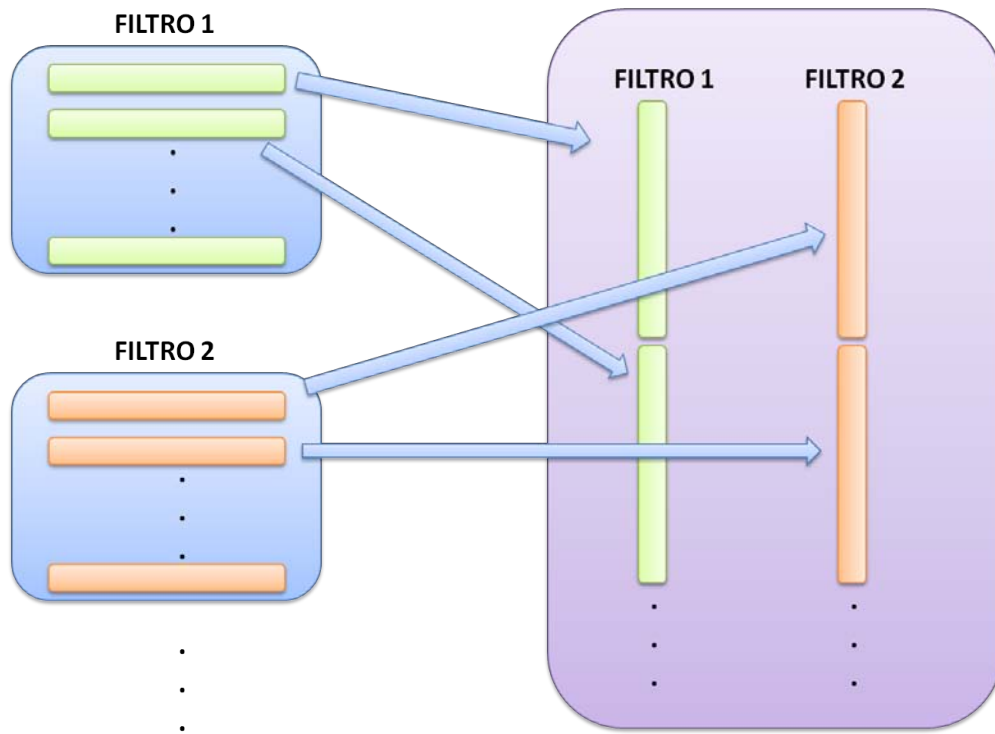
Por lo tanto, deberemos de reordenar cada imagen de modo que su dimensión inicial de 240×320 pase a ser de $(320 \cdot 240) \times 1$. En la Figura 9.6 podemos ver de forma gráfica esta operación. Descompondremos nuestra imagen fila a fila formando así el nuevo vector columna que necesitamos.

El código Matlab encargado de esta operación es el siguiente:

```
filtro1 = reshape(filtro1', 320*240,1);  
filtro2 = reshape(filtro2', 320*240,1);  
datos = [filtro1 filtro2];
```

Donde la función *reshape* toma los elementos de la matriz *filtroX* construyendo la matriz deseada. Dado que dicha función toma los elementos siguiendo las columnas de la matriz original y no las filas como deseamos, tendremos que transponer las imágenes previamente como puede verse en el código.

Figura 9.6: Acondicionamiento previo de las imágenes.



Algoritmo de cálculo de componentes principales

Una vez tenemos las imágenes correspondientes a cada filtro en la forma que deseamos, podemos calcular las componentes principales. Para ello, utilizamos la función *componentes_principales* que ya habíamos comentado.

El proceso de cálculo de componentes se lleva a cabo acorde al desarrollo que podemos encontrar en el capítulo 9 basado en la maximización de la varianza, para el que sus pasos pueden resumirse de la siguiente forma:

1. Sustracción de la media para cada una de las dimensiones de los datos.
2. Calcular la matriz de covarianza asociada.
3. Encontrar los autovectores y autovalores de la matriz de covarianza obtenida.
4. Obtener cada una de las varianzas para cada variable y ordenarlas de forma decreciente.

5. Por último, proyectar nuestro conjunto de datos sobre los autovectores obtenidos que forman el nuevo subespacio.

Y el código encargado del proceso es el siguiente:

```
% Lleva a cabo el cálculo de las componentes asociadas a la matriz datos,  
% siguiendo el proceso de maximización de varianza  
% datos - matriz MxN con las imágenes de todos los filtros seleccionados  
% resultado - matriz con MxN con la proyección de nuestros datos sobre los  
% autovectores obtenidos  
function [resultado,autovectores,autovalores] = componentes_principales(datos);  
[M,N] = size(datos);  
% Calculamos la media  
mn = mean(datos,2);  
% Sustraemos la media obtenida a los datos originales, por lo que tendremos  
% que extender el resultado acorde a las dimensiones de los datos, por lo  
% que empleamos la función repmat  
datos = datos - repmat(mn,1,N);  
% Calculamos la matriz de covarianza  
covarianza = 1 / (N-1) * datos * datos';  
% Obtenemos los autovectores y autovalores  
[autovectores, autovalores] = eig(covarianza);  
% Extraemos las varianzas de cada variable  
autovalores = diag(autovalores);  
% Y ahora las ordenamos en orden decreciente de forma que la primera  
% componente principal absorba la mayor parte y así sucesivamente.  
[l, indices] = sort(-1*autovalores);  
autovalores = autovalores(indices);  
% Reordenamos también los autovectores de acuerdo a los mismos índices que  
% emplean los autovalores asociados  
autovectores = autovectores(:,indices);  
% Proyectamos los datos sobre el nuevo subespacio  
resultado = autovectores' * datos;
```

Podríamos haber hecho uso de la función *princomp* que el propio Matlab nos ofrece, aunque debido a su simplicidad optamos por implementarla nosotros mismos.

Acondicionamiento para la visualización en LabView

Para poder visualizar en LabView de forma directa las componentes principales obtenidas, deberemos de nuevo modificar su estructura de forma que volvamos a disponer de una matriz (240×320). Para ello, tendremos que llevar a cabo el proceso inverso al acondicionamiento previo, que puede resumirse en las siguientes líneas de código para el caso de la segunda componente principal:

```
for i=1:240
    cp2(i,:)= componentes((i-1)*320+1:i*320,2);
end
```


Parte IV

EXPERIMENTOS Y CONCLUSIONES

Capítulo 10

Experimentos realizados

En este capítulo comentaremos los experimentos llevados a cabo con el objetivo de demostrar el correcto funcionamiento de nuestro sistema. Para ello nos valdremos de dos escenarios diferentes con los que trataremos de validar lo siguiente:

1. La correcta sincronización de todos los elementos del sistema de adquisición, de forma que las imágenes adquiridas sean tomadas en el instante correcto y no se aprecien en ellas síntomas de alguna posible descordinación.
2. Que el análisis por componentes principales se realiza de forma adecuada y podemos visualizarlo correctamente de forma paralela a la adquisición de imágenes.
3. Justificación del procesado multiespectral. Es decir, mostrar qué información adicional nos aporta y sus posibles aplicaciones, de forma que podamos justificar así el desarrollo de nuestro todo el trabajo realizado.

10.1. Primer experimento

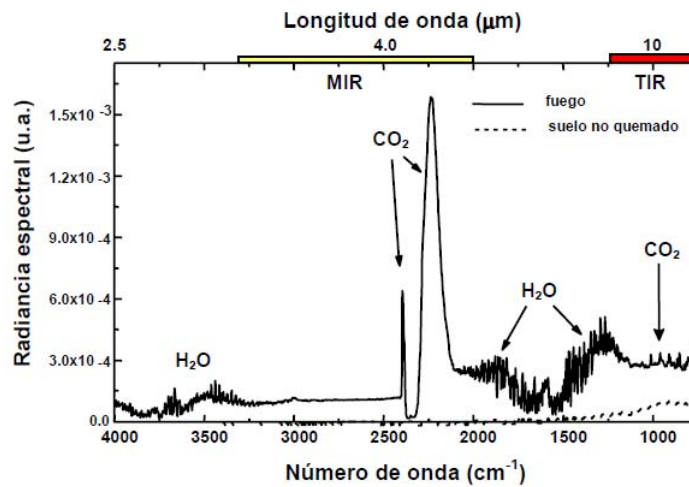
Para realizar nuestro primer experimento utilizaremos dos fuentes de radiación de características espectrales diferentes:

- Un cuerpo negro (con una temperatura de 500°C). En el laboratorio disponemos de instrumentos encargados de emular las características de este tipo de cuerpos. Como explicamos en el capítulo 2, dedicado a las

fuentes de radiación, un cuerpo negro representa a un emisor perfecto, en el que su emisividad es constante e igual a la unidad. En ese mismo capítulo, en la Figura 2.1 podemos encontrar la distribución de la emitancia con respecto a la longitud de onda, lo que nos ayudará a comprender mejor los resultados obtenidos.

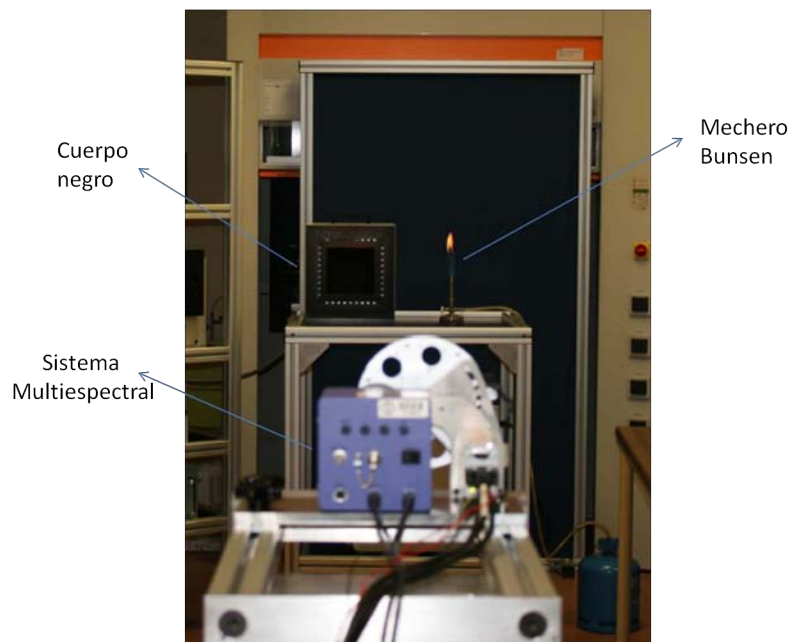
- Un llama obtenida por medio de un mechero Bunsen que es alimentado con gas butano. Al igual que para el caso del cuerpo negro, en la Figura 10.1 [1] podemos encontrar la emitancia espectral para el de una llama, donde podemos destacar los picos de emisión del CO_2 .

Figura 10.1: Emitancia espectral de una llama.



Ambas fuentes serán dispuestas una al lado de la otra sobre una mesa de laboratorio, como puede observarse en la fotografía de la Figura 10.2, donde puede verse el escenario completo del experimento. Colocaremos nuestro sistema multiespectral justo en frente de ambas fuentes y lo más centrado posible, a una distancia de aproximadamente 5 metros. Para poder colocarlo a la misma altura que la mesa de laboratorio, utilizaremos uno de los trípodes de los que disponemos en el laboratorio.

Figura 10.2: Primer experimento.



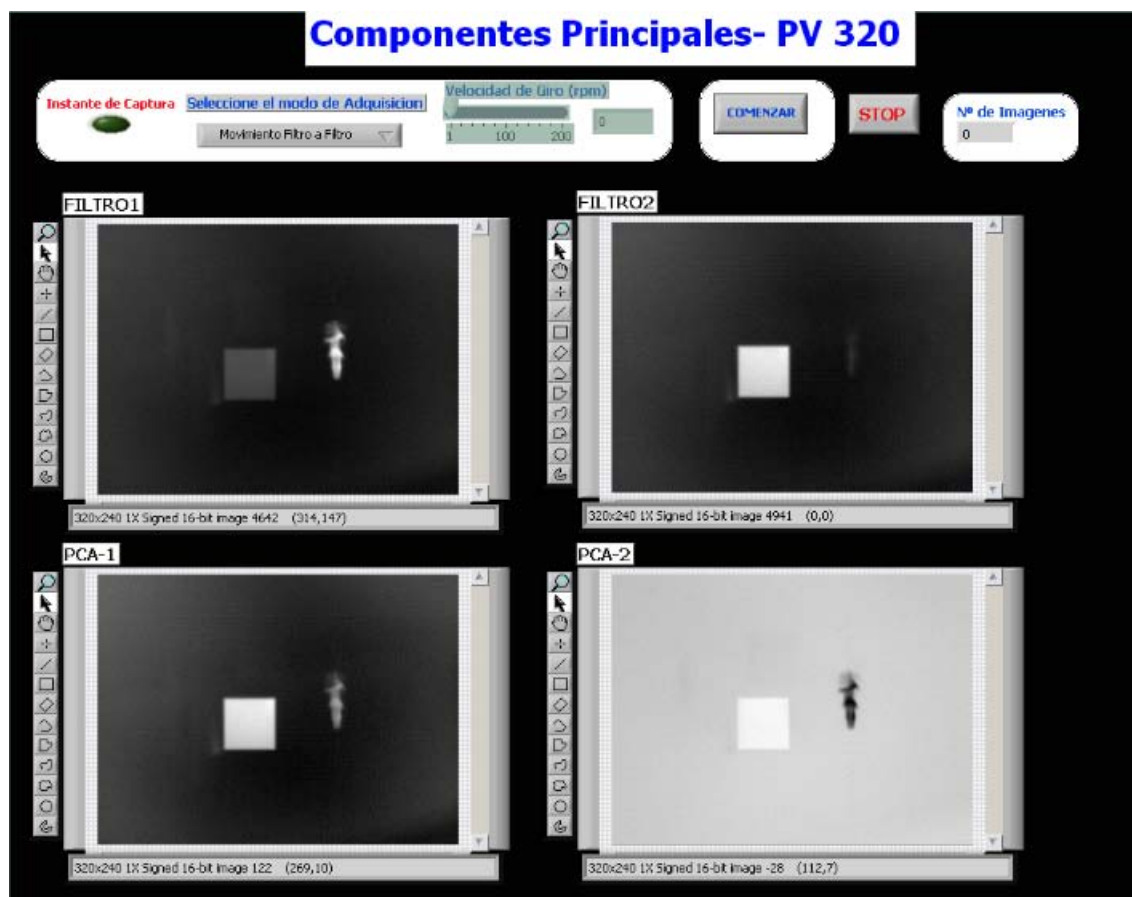
Imágenes obtenidas

Una vez dispuestos todos los elementos que necesitamos procederemos a la adquisición del escenario descrito. Para ello emplearemos únicamente dos filtros interferenciales:

- Filtro 1, centrado a $4,3\ \mu m$ y con un ancho espectral de $200\ nm$.
- Filtro 2, centrado a $3,36\ \mu m$ y con una anchura de $158\ nm$.

En nuestra aplicación seleccionaremos el modo *filtro a filtro* ya que en este caso no será necesaria una elevada velocidad de giro puesto que el escenario no es excesivamente cambiante. En la Figura 10.3 podemos ver un conjunto de imágenes formado por las correspondientes a los dos filtros interferenciales y a las dos primeras componentes principales. Nótese que hemos añadido la visualización de la primera componente principal para poder comparar los resultados de ambas.

Figura 10.3: Adquisición del primer experimento.



A la vista de las imágenes resultantes ya podríamos obtener unas primeras conclusiones del experimento, pero para poder justificarlas de una forma más cuantitativa recurriremos a un análisis posterior.

Análisis posterior

Para realizar el análisis de las imágenes hemos utilizado la aplicación de procesamiento *ENVI*¹, que nos permite visualizar las imágenes salvadas por nuestra aplicación para realizar una gran variedad de medidas y operaciones.

Una de las posibilidades que nos ofrece es la obtención de perfiles a lo largo

¹Podemos encontrar más información acerca de este software en la siguiente dirección web <http://www.ittvvis.com/ProductServices/ENVI.aspx>

de la dimensión que deseemos (vertical u horizontal) para un píxel determinado. Si seleccionamos un perfil a lo largo del eje de abscisas de forma que incluya las dos fuentes empleadas, podremos comparar los niveles digitales de ambas fuentes de una forma más práctica.

Aplicaremos esta herramienta al conjunto de imágenes formado por los dos filtros y las dos primeras componentes, tal y como se mostraba en la aplicación LabView de procesado. En las siguientes Figuras 10.4, 10.5, 10.6 y 10.7 se muestran cada una de las imágenes visualizadas con Envi junto a su perfil horizontal.

En la Figura 10.4 podemos ver como en el primero de los filtros, centrado en $4,3\mu m$, tiene una gran influencia la llama del mechero Bunsen, observándose un fuerte pico (unos 900 niveles digitales por encima del cuerpo negro) en dicha zona. Esto es debido a que el Filtro 1 se encuentra centrado dentro de la banda de emisión del CO_2 , como puede comprobarse en la Figura 1.2. La combustión de la llama produce la liberación de dicho gas y, al encontrarse éste a una temperatura muy elevada, produce una fuerte emisión en la banda espectral indicada en la Figura 1.2 que es recogida por nuestro primer filtro.

El segundo filtro, centrado en $3,36\mu m$, se encuentra alejado de la banda de emisión del CO_2 , de modo que no recoge apenas la radiación producida por la llama como puede verse en la Figura 10.5. En cambio, recoge una mayor cantidad de la energía emitida por el cuerpo negro si comparamos con el primer filtro, ya que en el perfil puede verse como los niveles digitales correspondientes a dicha zona se han visto incrementados hasta casi el valor de 6000, produciéndose una diferencia de casi 1000 niveles digitales. Esto se debe a la distribución espectral de la emitancia para un cuerpo negro, que viene dada por la ley de Plank y ya comentamos en el capítulo 2, cuyo pico de emisión se expresa a través de la ley de desplazamiento de Wien y, en nuestro caso, para una temperatura de $500^{\circ}C$ obtenemos:

$$\lambda_{pico} = \frac{2897,8}{T} = \frac{2897,8}{(500 + 273,15)} = 3,74\mu m \quad (10.1.1)$$

que se encuentra más cerca de este segundo filtro, de modo que la energía emitida en su banda es mayor como se refleja en el perfil.

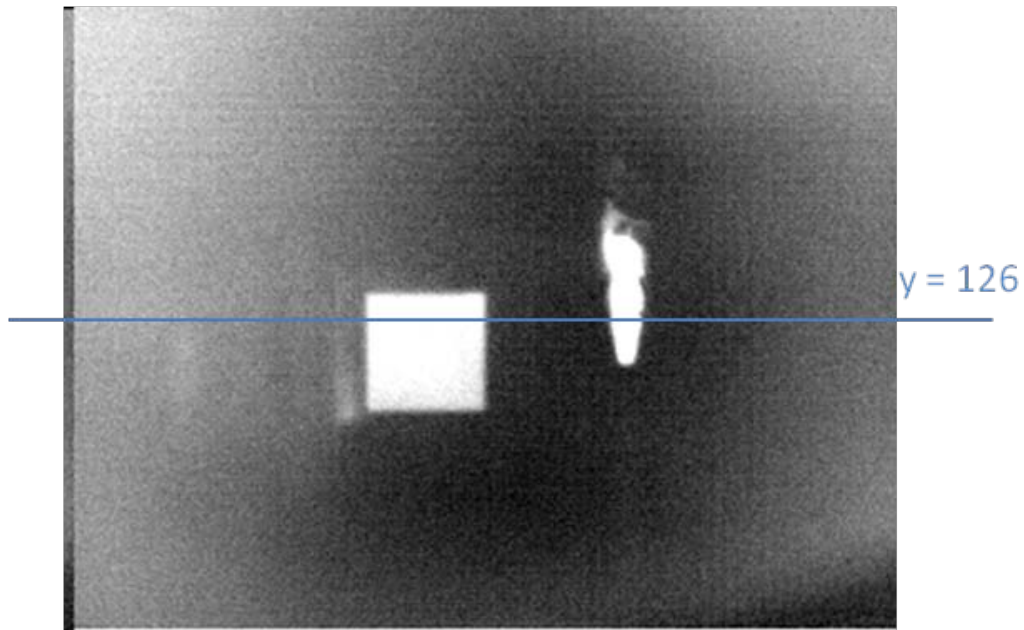
Por otro lado, en la primera componente principal mostrada en la Figura 10.6 obtenemos valores comparables tanto para la llama como para el cuerpo negro, produciendo una menor diferencia en niveles digitales entre ambas fuentes que las obtenidas con los filtros de forma independiente. Esto es esperable dado que la primera componente siempre será aproximadamente una media

ponderada de las bandas, lo que será importante de cara a futuras labores de clasificación como veremos más adelante.

Por último, en la segunda componente principal, Figura 10.7, podemos apreciar dos características interesantes:

- La primera de ellas es que se ha producido una gran diferenciación entre ambas fuentes de radiación, llama y cuerpo negro, exagerándose en mayor medida las diferencias entre los elementos del experimento.
- Además podemos comprobar una fuerte disminución del nivel digital de fondo frente al que obteníamos en las imágenes originales, siendo éste más uniforme en este último caso.

Figura 10.4: Análisis del primer filtro.

(a) Imagen adquirida por Filtro1— $4,3\ \mu m$.

(b) Perfil horizontal sobre la llama y el cuerpo negro.

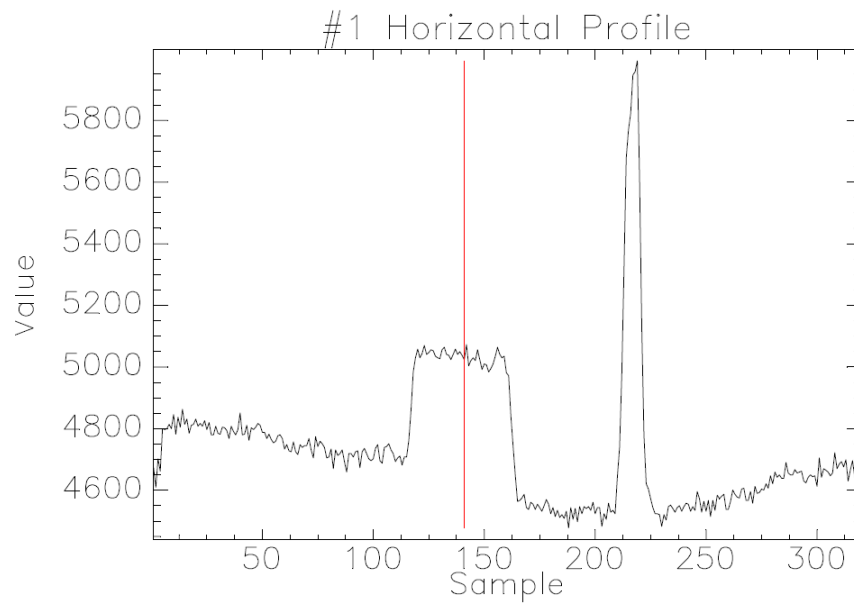
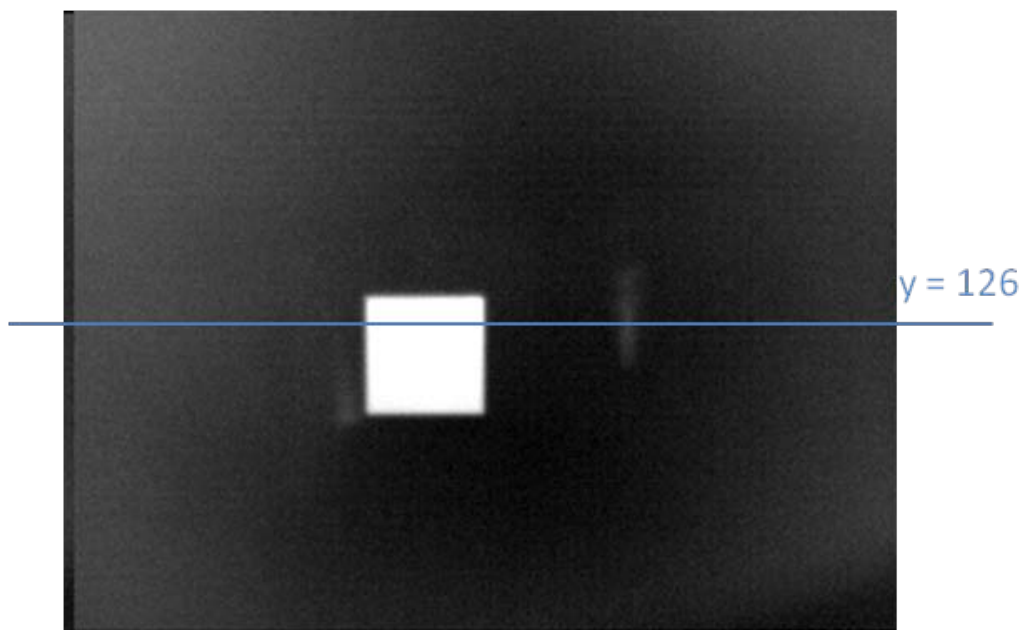


Figura 10.5: Análisis del segundo filtro.

(a) Imagen adquirida por Filtro2— $3,36\ \mu\text{m}$.

(b) Perfil horizontal sobre la llama y el cuerpo negro.

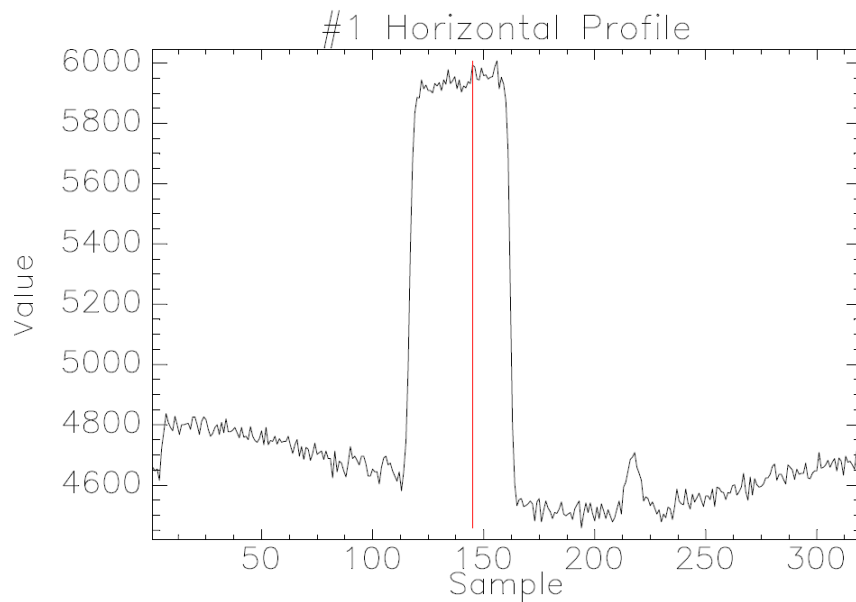
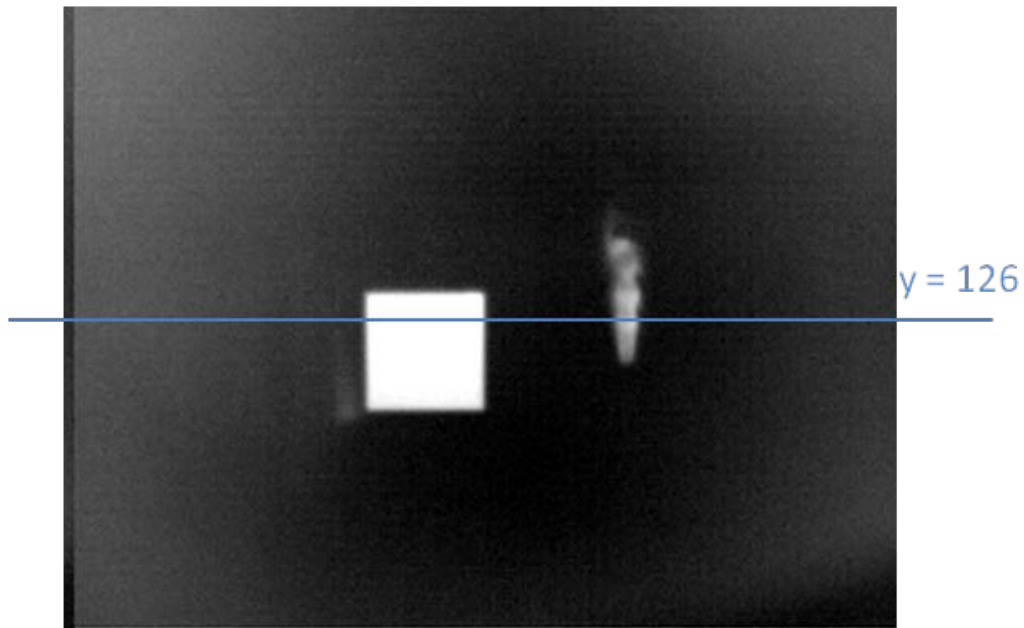


Figura 10.6: Análisis de la primera componente principal.

(a) Primera componente principal.



(b) Perfil horizontal para la primera componente.

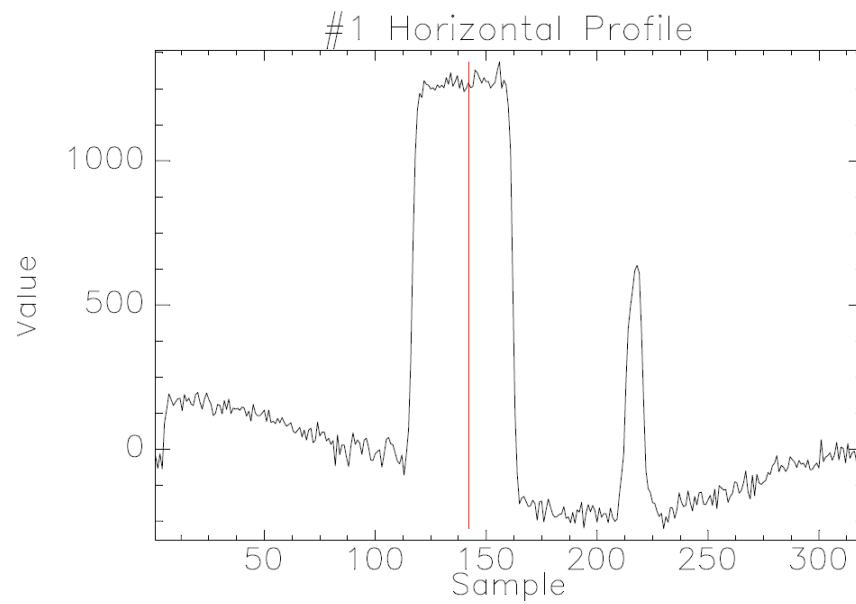
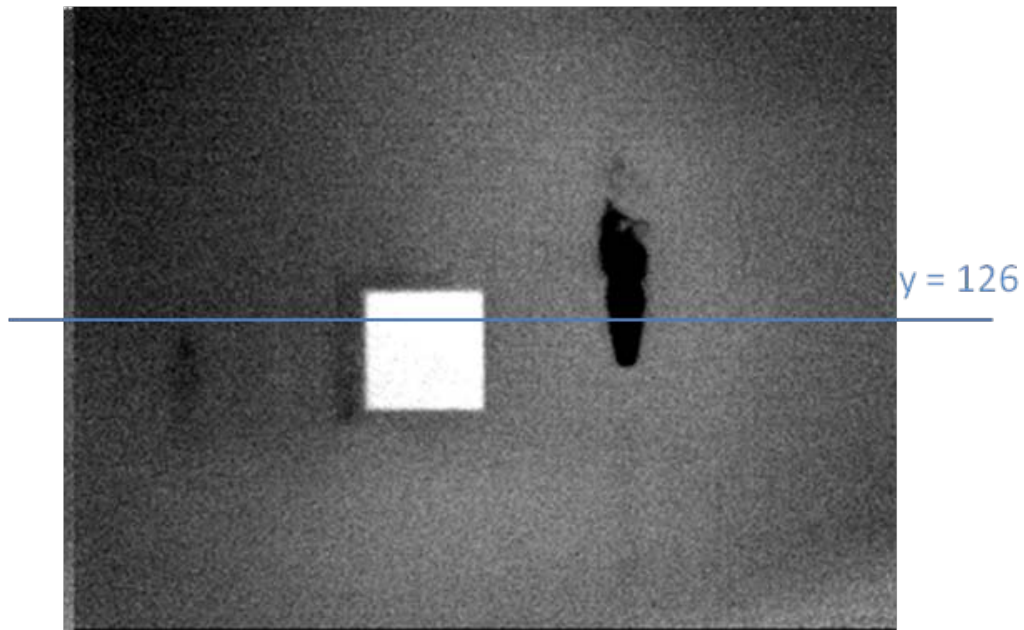
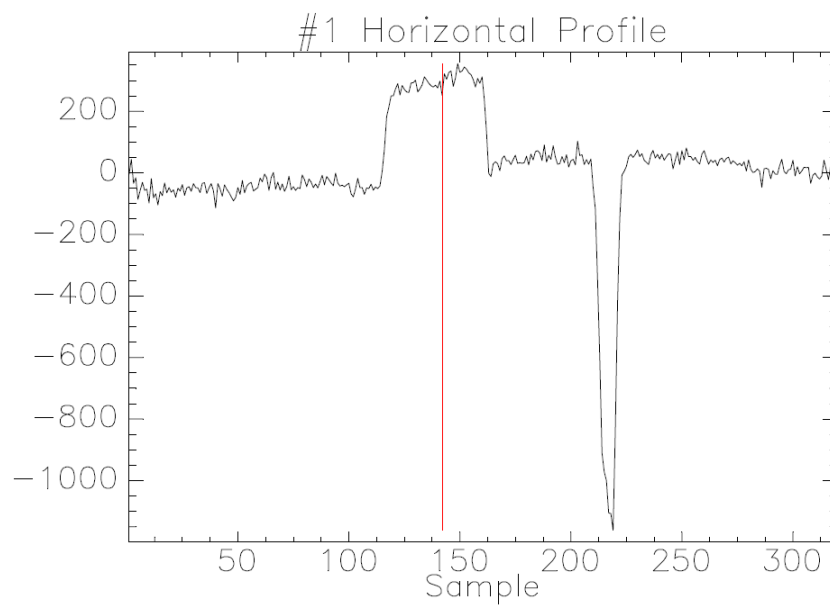


Figura 10.7: Análisis de la segunda componente principal.

(a) Segunda componente principal.



(b) Perfil horizontal para la segunda componente.



Podemos cuantificar el incremento de la diferenciación que obserbábamos en la segunda componente principal mediante la definición de un ratio, que nos permita además comparar los resultados de todas las imágenes. El ratio (R) que emplearemos quedará definido de la siguiente manera:

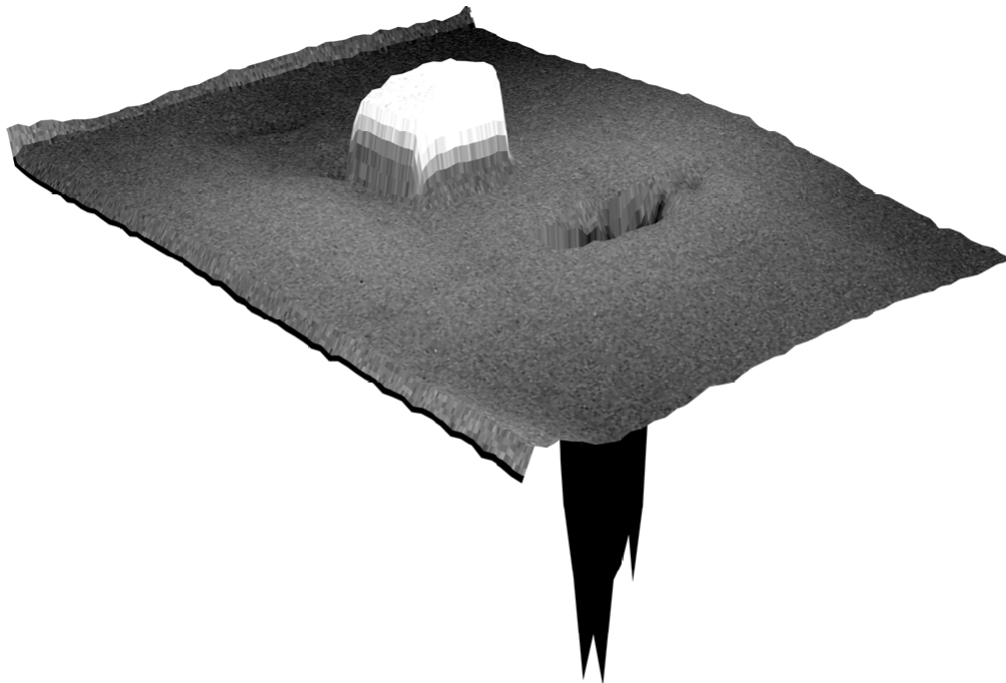
$$R = \left| \frac{ND_{llama} - ND_{CN}}{ND_{CN}} \right| \quad (10.1.2)$$

Para llevar esto a cabo seleccionaremos dos píxeles correspondientes a las regiones de llama y de cuerpo negro, obteniendo los resultados de la Tabla 10.1 para los píxeles (140, 126) y (217, 126) correspondientes al cuerpo negro y a la llama respectivamente.

Cuadro 10.1: Comparativa del ratio R .

Filtro 1	Filtro 2	Primera Componente	Segunda Componente
0.22	0.21	0.45	5.09

Figura 10.8: Vista en tres dimensiones de la segunda componente principal.



Comparando los valores obtenidos para el ratio R podemos apreciar como la segunda componente se desmarca del resto de valores, obteniendo una gran diferencia de niveles entre el cuerpo negro y la llama. La segunda componente es capaz de utilizar la información proporcionada por ambas bandas para lograr así un mayor contraste entre los elementos del escenario, magnificando las diferencias entre ellos como puede verse en la representación tridimensional de la Figura 10.8.

Debido a estas características podremos encontrar una gran utilidad a este análisis de cara a futuras labores de clasificación. Para demostrarlo llevaremos a cabo un proceso de clasificación empleando el algoritmo no supervisado *k-means* provisto en el entorno *ENVI*. Se trata de un procedimiento iterativo que identifica un número prefijado de clases mediante la definición de agrupamientos (*clusters*) en base a la proximidad de sus niveles digitales. Podremos encontrar una descripción completa de este algoritmo en [17] y en [18].

Al igual que hicimos al hablar de los perfiles horizontales, aplicaremos el algoritmo *k-means* tanto a las imágenes de los dos filtros como a las dos componentes principales, como podemos ver en las Figuras 10.9, 10.10, 10.11 y 10.12. Además, para la configuración del algoritmo seleccionaremos un número de cuatro clases diferentes a identificar e impondremos un máximo de cinco iteraciones.

Figura 10.9: Resultado del algoritmo k-means sobre el primer filtro.

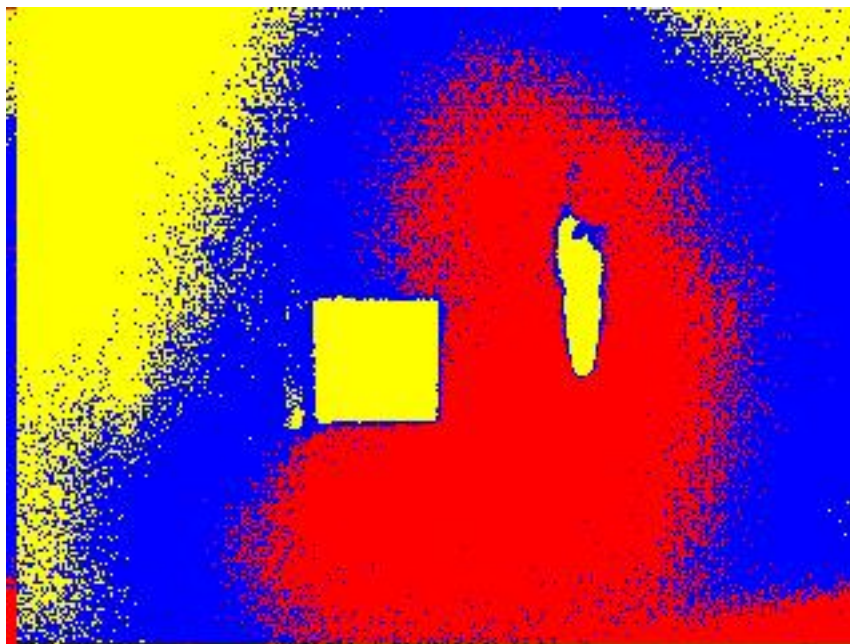


Figura 10.10: Resultado del algoritmo k-means sobre el segundo filtro.

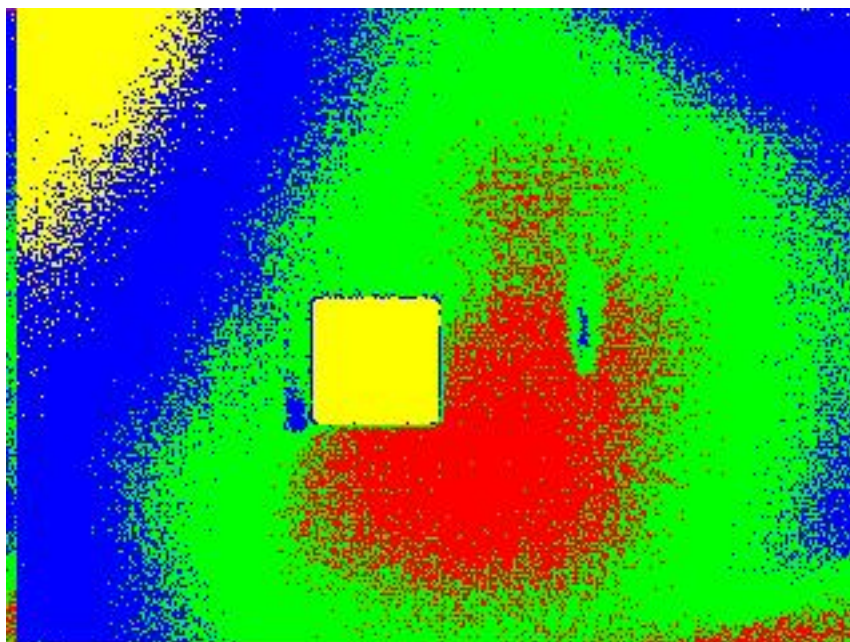


Figura 10.11: Resultado del algoritmo k-means sobre la primera componente.

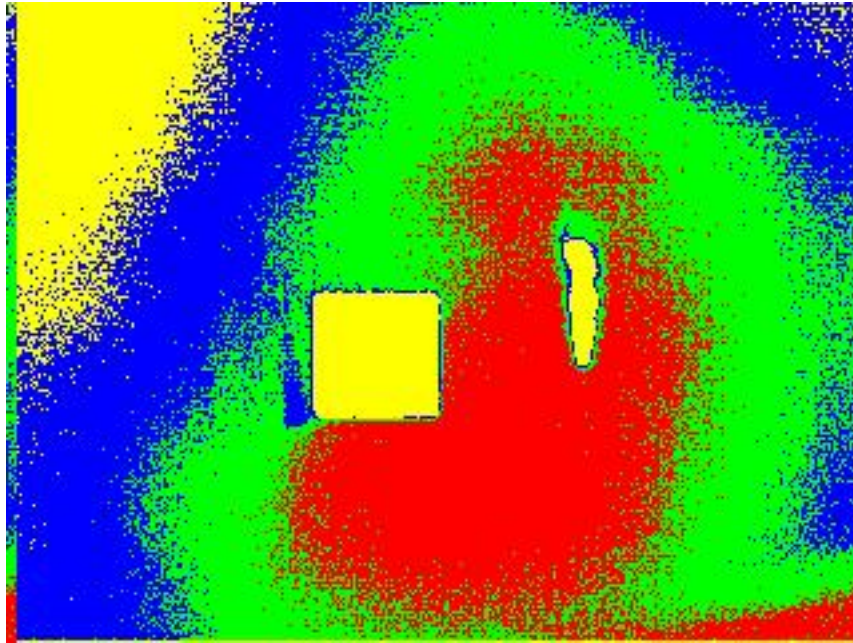
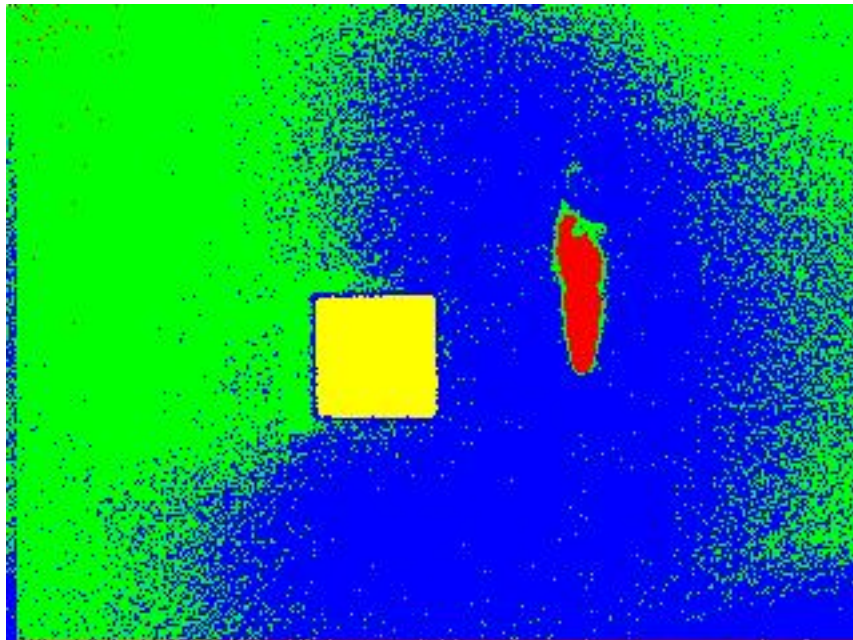


Figura 10.12: Resultado del algoritmo k-means sobre la segunda componente.



Aplicando este proceso podemos ver como el único caso en el que el algoritmo es capaz de conducir a una clasificación correcta, distinguiendo llama de cuerpo de negro, se corresponde con la segunda componente. En ella pueden diferenciarse dos regiones más aparte del cuerpo negro y la llama que se identifican con las zonas del escenario más próximas (y por lo tanto a mayor temperatura) y más lejanas de las fuentes de radiación.

Exceptuando el caso de la segunda componente, para que el algoritmo k-means fuera capaz de diferenciar correctamente el cuerpo negro de la llama, por ejemplo, requeriría de muchas más bandas² entre las que realizar el proceso de clasificación. Lo que se traduce en un incremento del número de operaciones necesarias y pone de manifiesto la utilidad del cálculo de componentes principales a la hora de abordar la clasificación de un determinado escenario.

10.2. Segundo experimento

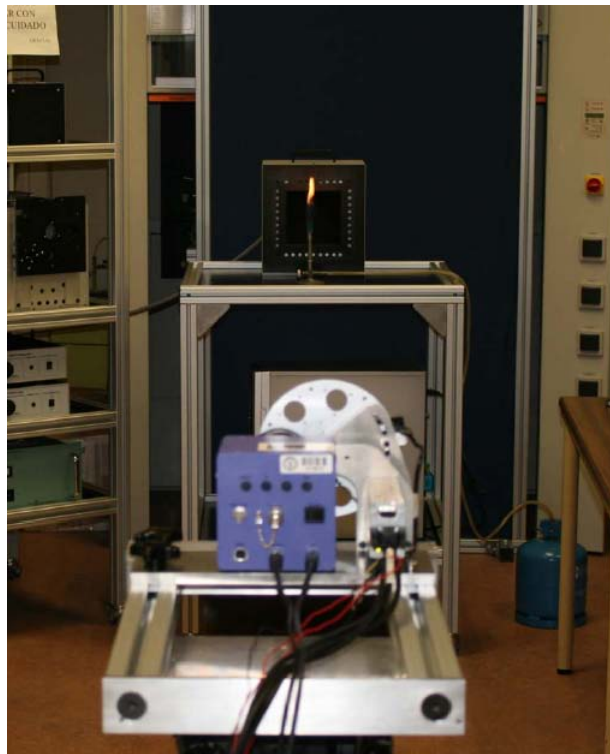
En este segundo experimento hemos modificado ligeramente las condiciones del anterior colocando el mechero Bunsen justo delante del cuerpo negro, como podemos ver en la Figura 10.13.

Tras esto, hemos vuelto a adquirir imágenes utilizando nuestro sistema multiespectral empleando los mismos filtros que en el caso anterior y obteniendo las imágenes de las Figuras 10.14, 10.15, 10.16 y 10.17.

Si analizamos las imágenes obtenidas, caemos en la cuenta de que en este caso ya no resulta tan sencillo diferenciar entre llama y cuerpo negro. En el primero de los filtros sólo podemos distinguir la región de la llama que sobresale del cuerpo negro, mientras que en el segundo casi no podemos diferenciar ninguna parte de la llama.

²El empleo de un mayor número de bandas se traduce en un incremento del número de dimensiones disponibles, que conlleva mayores ventajas de cara a la clasificación [18].

Figura 10.13: Escenario correspondiente al segundo experimento.



Por otro lado, en la primera componente principal la identificación de la zona de la llama que se encuentra delante del cuerpo negro se hace más difícil todavía, por lo que no nos aporta información alguna. En cambio, la segunda componente principal nos muestra una gran diferencia entre ambas fuentes de radiación, permitiéndonos su fácil identificación a simple vista, algo que sólo con el uso de los filtros resultaba imposible.

Figura 10.14: Imagen correspondiente al primer filtro.



Figura 10.15: Imagen correspondiente al segundo filtro.

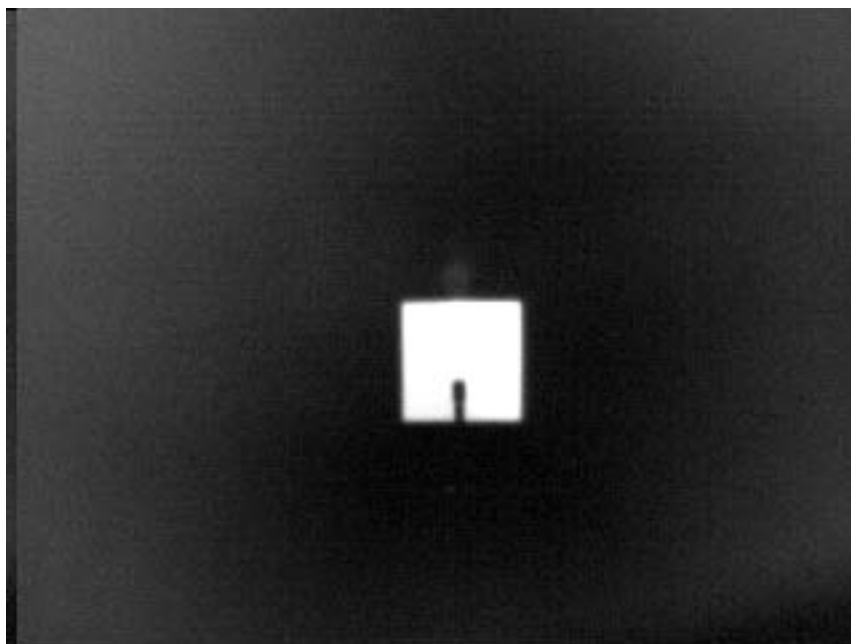


Figura 10.16: Imagen correspondiente a la primera componente.

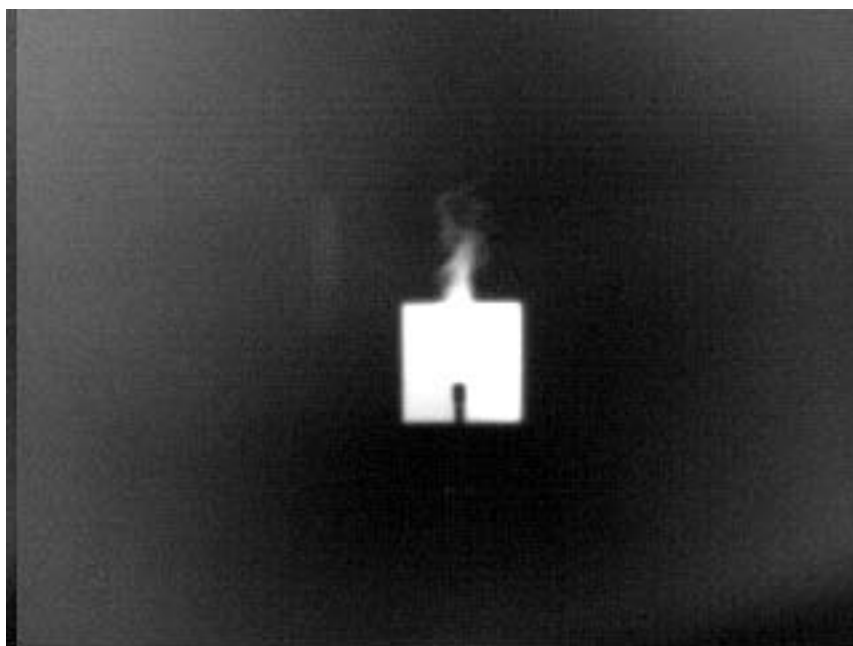
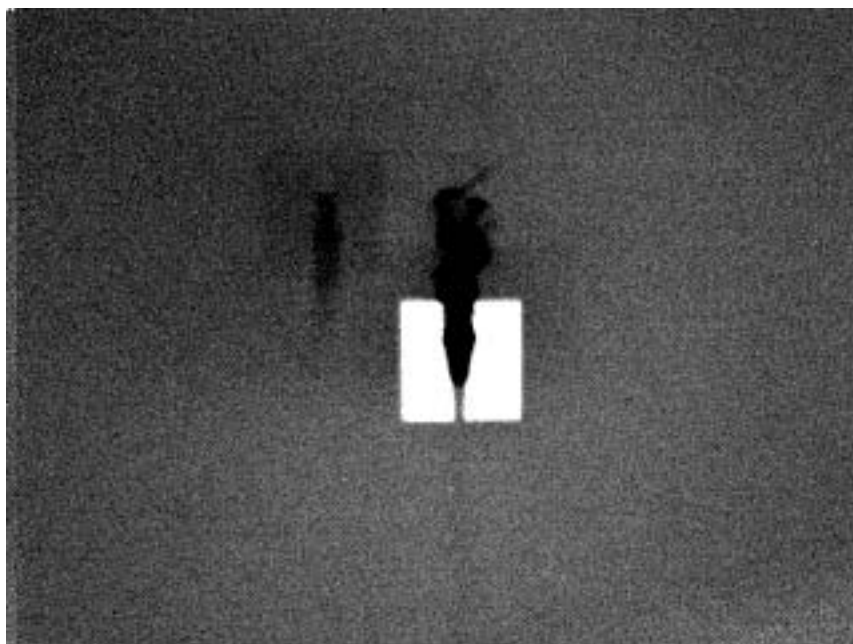


Figura 10.17: Imagen correspondiente a la segunda componente.



Si empleamos de nuevo el algoritmo *k-means* con la misma configuración que en el primer experimento (cuatro clases y cinco iteraciones), obtenemos las imágenes de las Figuras 10.18, 10.19, 10.20 y 10.21, en las que podemos ver como sólo nos ofrece una clasificación correcta en el caso de la segunda componente principal.

Por lo tanto, el hecho de realizar un pre-procesado mediante componentes principales nos permite clasificar incluso este escenario, en el que radica una mayor dificultad que en el caso anterior dado que los elementos que lo componen son más difíciles de distinguir [19]. De esta forma se justifica nuevamente el cálculo de componentes principales (y por ende el desarrollo de un sistema multiespectral en el infrarrojo) como procesado previo a las labores de clasificación.

Figura 10.18: Resultado del algoritmo k-means para el primer filtro.

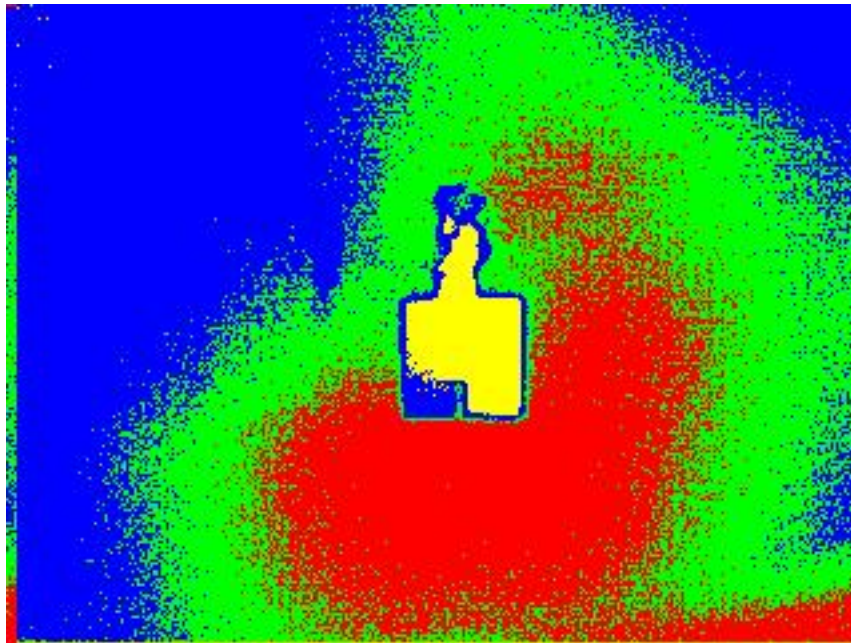


Figura 10.19: Resultado del algoritmo k-means para el segundo filtro.

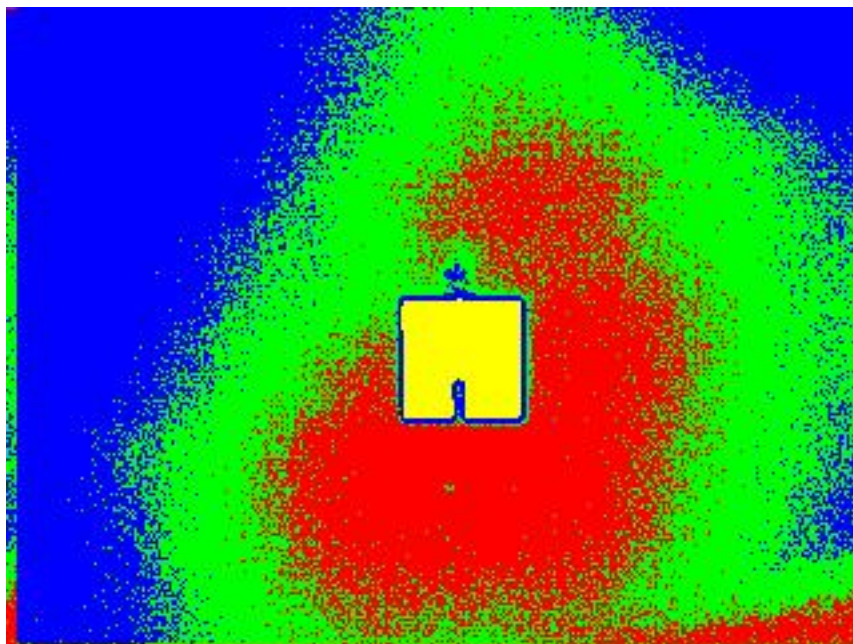


Figura 10.20: Resultado del algoritmo k-means para la primera componente.

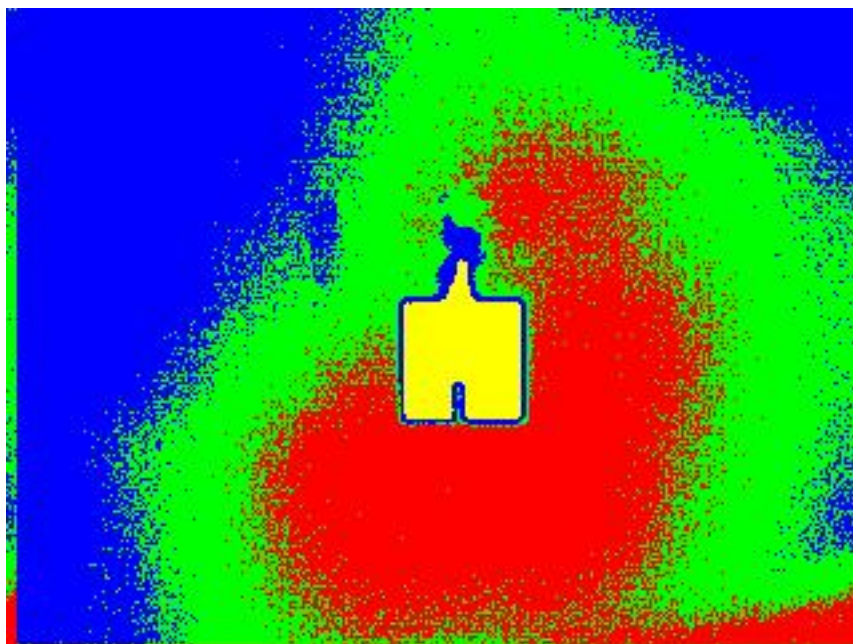
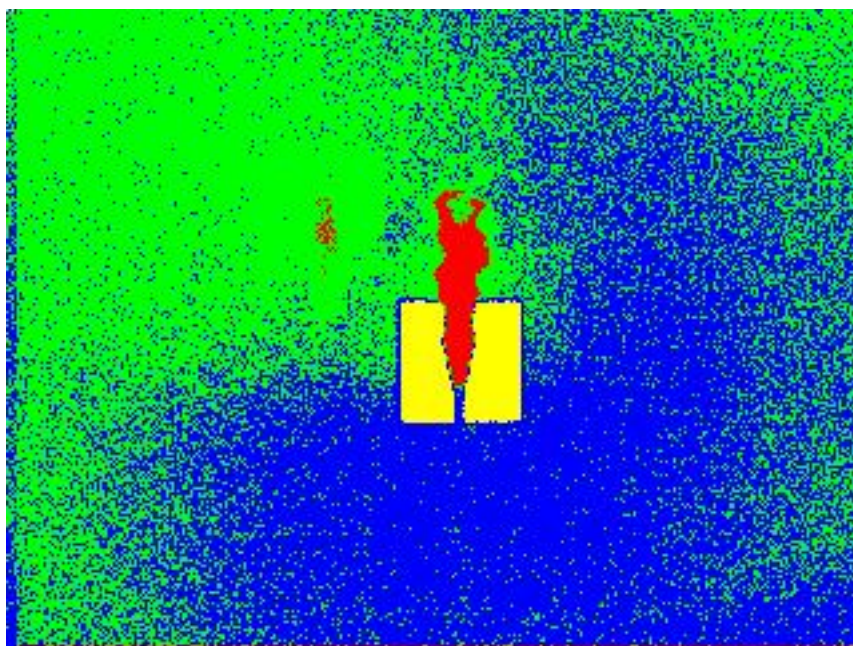


Figura 10.21: Resultado del algoritmo k-means para la segunda componente.



Capítulo 11

Conclusiones

El trabajo realizado ha supuesto la consecución de los objetivos propuestos al comienzo de esta memoria: hemos logrado gestionar los elementos de los que disponíamos en el laboratorio para construir un sistema de adquisición de imagen multiespectral, que además ha sido dotado de la capacidad de procesamiento.

Dicho sistema de adquisición ha impuesto unos altos requerimientos de sincronización a nuestra aplicación y, pese a que podemos afirmar que éstos han sido superados en gran medida, la principal limitación de nuestro sistema vendrá dada precisamente por la relación de compromiso hallada entre su sincronización y el tiempo entre adquisiciones.

Una vez resuelto el problema de adquirir imágenes casi simultáneas en distintas bandas del infrarrojo, hemos desarrollado una aplicación de procesado en tiempo real mediante el análisis por componentes principales. Esto nos permite sacar partido de la información suministrada por cada una de las bandas y visualizarla de forma paralela a la adquisición.

En los experimentos realizados hemos podido comprobar como esta técnica de procesado resulta útil a la hora de mostrar ciertos aspectos del escenario que a simple vista permanecen ocultos, y puede sernos de gran ayuda en labores de clasificación de objetos con características espectrales diferentes, permitiéndonos la aplicación directa de algoritmos sencillos como *k-means*.

11.1. Líneas futuras

11.1.1. Líneas de desarrollo

La principal línea de desarrollo de nuestro proyecto tendrá como objetivo minimizar el tiempo que transcurre entre las imágenes adquiridas, es decir, incrementar la velocidad de giro máxima de la rueda portafiltros que es tolerada por nuestro sistema. Con dicho propósito se proponen las siguientes mejoras:

- Debido a que una de las limitaciones con las que contamos es el hecho de compartir el acceso al procesador con el resto de aplicaciones, resultaría interesante la utilización de un sistema operativo de tiempo real, como por ejemplo *LabView Real Time* de National Instruments¹. De modo que podamos controlar en todo momento qué aplicaciones son ejecutadas, reduciendo así la aleatoriedad en el acceso al procesador.
- Dado que tratamos de realizar el procesamiento digital en tiempo real o cuasi real, nos interesaría optimizar en la medida de lo posible las operaciones involucradas en dicho procesamiento. Para ello, una posible opción consistiría en crearnos nuestra propia librería compilada en lenguaje C a partir del código Matlab, la cual podría ser importada en el entorno LabView y utilizada como un simple instrumento virtual. Quizás el mayor inconveniente de esta solución reside en las diferentes interpretaciones de los tipos de datos por parte de los lenguajes LabView y Matlab. Esto se traduce por ejemplo en el uso de vectores, donde Matlab los interpreta de forma traspuesta. Para solucionar este inconveniente deberemos desarrollar funciones denominadas *wrapper* que sirvan de pasarela entre ambos lenguajes, con la complejidad que esto conlleva.

Por otro lado, con el fin de reducir la complejidad del sistema y facilitar el clasificado de las imágenes entre las distintas bandas, podríamos añadir tres salidas más a la electrónica de control, de forma que supiéramos a qué filtro corresponde la imagen tomada en ese instante y no requerir así de una referencia previa.

Por último, y a la vista de los resultados obtenidos en los experimentos, podría resultar interesante la implementación del algoritmo de clasificación *k-means* en nuestro sistema multispectral, dado que, complementado con el

¹Podemos encontrar información acerca de este producto en <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/2381>

cálculo de componentes principales nos permitiría clasificar los elementos más relevantes de una escena dada en tiempo real de ejecución y de forma automática.

11.1.2. Aplicaciones futuras

Al margen de las mejoras propuestas podemos emplear el sistema desarrollado en multitud de aplicaciones:

- Calibración radiométrica del sistema, de modo que podamos proporcionar temperaturas de brillo. Para ello se requieren una serie de operaciones adicionales (cálculo de parámetros BRF, ajustes de ganancia y offset,...) que podrían implementarse en tiempo real también.
- Aplicaciones a problemas en los que pueda extraerse toda la potencia que le aporta al sistema su gran ancho de banda espectral, y en particular la posibilidad de adquirir casi simultáneamente en las regiones NIR, MIR y TIR:
 - Medida de temperaturas de objetos de los que desconocemos su emisividad [22].
 - Método de emisión-transmisión multiespectral para el cálculo de temperaturas reales de objetos.

Parte V

ANEXOS

Anexo I. Promediado de imágenes

Dado que estamos interesados en las ventajas que pueda reportarnos esta operación, en este anexo trataremos de analizar de forma teórica la operación de promediado de imágenes, planteándola como la siguiente expresión [11]:

$$p[m, n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N I_j[m, n] \quad (11.1.1)$$

donde:

- $I_j[m, n]$ representa los niveles digitales de cada uno de los píxeles de la imagen I_j a lo largo de ambas dimensiones espaciales m y n .
- N es el número de imágenes sobre el que se realiza la operación.
- $p[m, n]$ representa la nueva imagen resultante del promediado.

Para poder estimar de forma correcta los resultados que conllevan realizar un promediado sobre un cierto número de imágenes N , primero deberemos describir correctamente todos los procesos implicados en términos estadísticos. Para ello, diferenciaremos dentro de cada imagen I dos términos:

$$I[m, n] = O[m, n] + \eta[m, n] \quad (11.1.2)$$

donde:

- $O[m, n]$ hace referencia a la imagen original, esto es libre de toda perturbación o ruido.
- $\eta[m, n]$ es un proceso estocástico espacial, típicamente estacionario, de media nula y varianza desconocida σ^2 con el que modelaremos el ruido introducido.

Para esto, tendremos que asumir que los instantes entre los que se adquieren las imágenes son lo suficientemente grandes como para garantizar que las muestras de ruido son incorreladas, y además lo suficientemente pequeños como para suponer que la escena no ha cambiado demasiado, de modo que los niveles digitales de cada imagen tampoco lo hagan.

Una vez descrito el problema en términos estadísticos, podemos obtener la media y la varianza de la imagen resultante del promedio de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E[p[m, n]] &= E\left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N I_j[m, n]\right] = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N E[I_j[m, n]]\right] = \\ &= \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N E[O_j[m, n] + \eta[m, n]]\right] = \frac{N}{N} \cdot O[m, n] = O[m, n] \end{aligned}$$

$$Var[p[m, n]] = Var\left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N I_j[m, n]\right] = \frac{1}{N^2} \left[\sum_{j=1}^N Var[I_j[m, n]]\right] = \frac{N}{N^2} \cdot \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{N}$$

De modo que la imagen promediada sufrirá una reducción en la potencia de ruido de $1/N$.

Anexo II. Presupuesto

Finalmente incluiremos el presupuesto total del proyecto realizado, en el que se incluyen:

- Los gastos externos correspondientes al diseño, fabricación, mecanización y montaje del sistema portafiltros y de la electrónica de control.
- El resto de componentes hardware empleados, en los que se incluye además el ordenador necesario como soporte de todas las aplicaciones software.

En la siguiente página podemos encontrar el desglose de todos los costes asociados, obteniéndose que el **presupuesto total** de este proyecto asciende a la cantidad de **27991 euros**.

Figura 11.1: Presupuesto detallado.



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Miquel Àngel Rodríguez Conejo

2.- Departamento: Física

3.- Descripción del Proyecto:

-Título: Sistema Multiespectral de Adquisición y Procesado de Imagen en el Infrarrojo

- Duración (meses)

11 meses **20%**

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

27.991,00 Euros.

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^(*)	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Rodríguez Conejo, Miguel A.	15500912-Q	ingeniero	5	2.694,39	13.471,95	
Hombres mes 5				Total	13.471,95	

^{a)} 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)
Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ⁽⁴⁾
Cámara PV-320	30.000,00	100	6	60	3.000,00
PC Pentium D 2,33 GHz	995,60	100	6	60	99,56
					0,00
					0,00
					0,00
					0,00
					0,00
Total					3.099,56

^{a)} Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Sistema Portafiltros	Empresa Externa	1.893,06
Electrónica de control	Oficina Técnica	3.637,27
	Total	5.530,33

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO ⁹⁾

Descripción	Empresa	Costes imputable
Filtros Interferenciales		300,00
Motor EPOS	Maxon	800,00
Tarjeta Adq. NI-6501	National Instruments	124,38
	Total	1.224,38

^{e)} Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	13.472
Amortización	3.100
Subcontratación de tareas	5.530
Costes de funcionamiento	1.224
Costes Indirectos	4.665
Total	27.991

Anexo III. Esquemas electrónicos

Figura 11.2: Esquema correspondiente al circuito emisor.

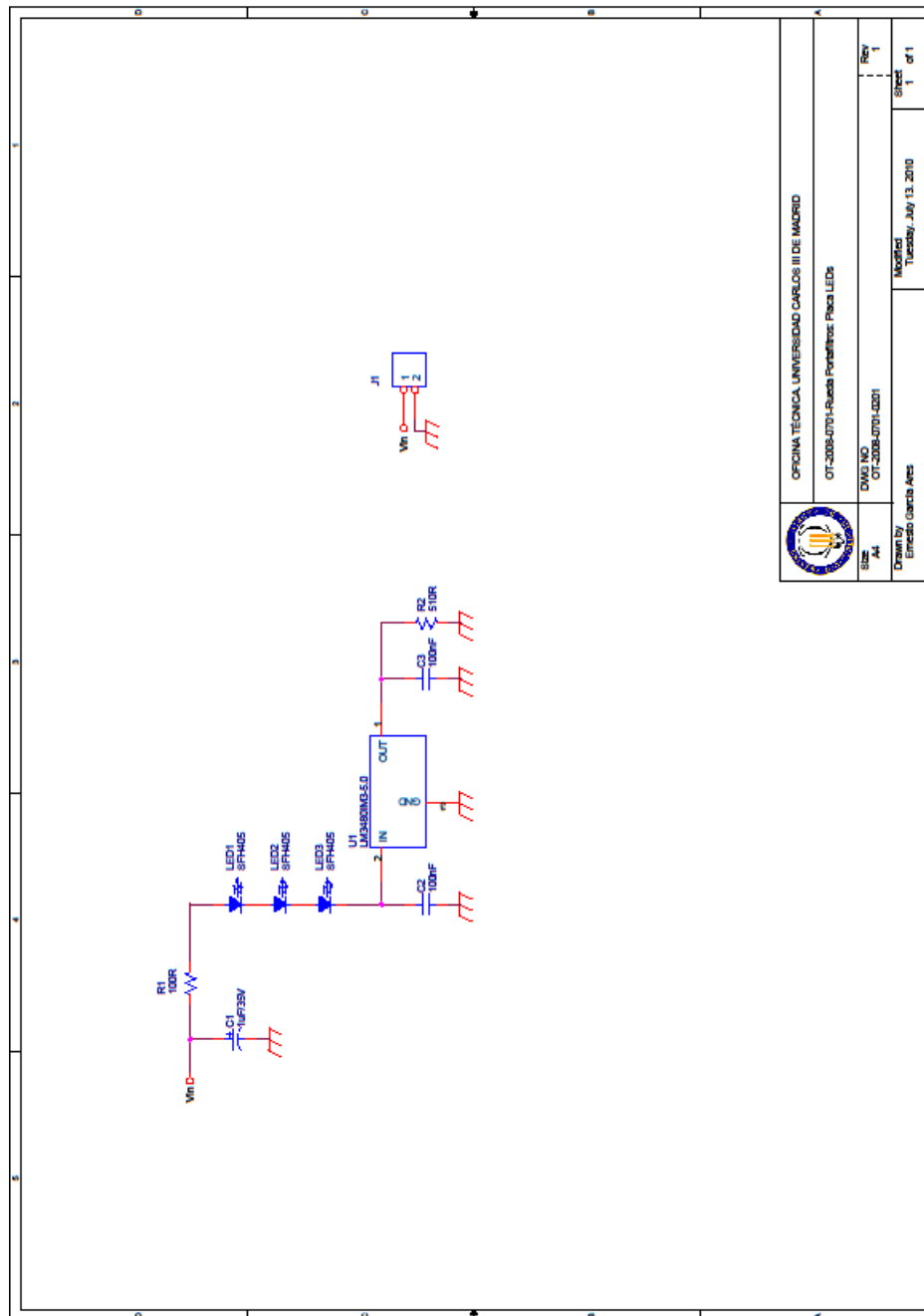
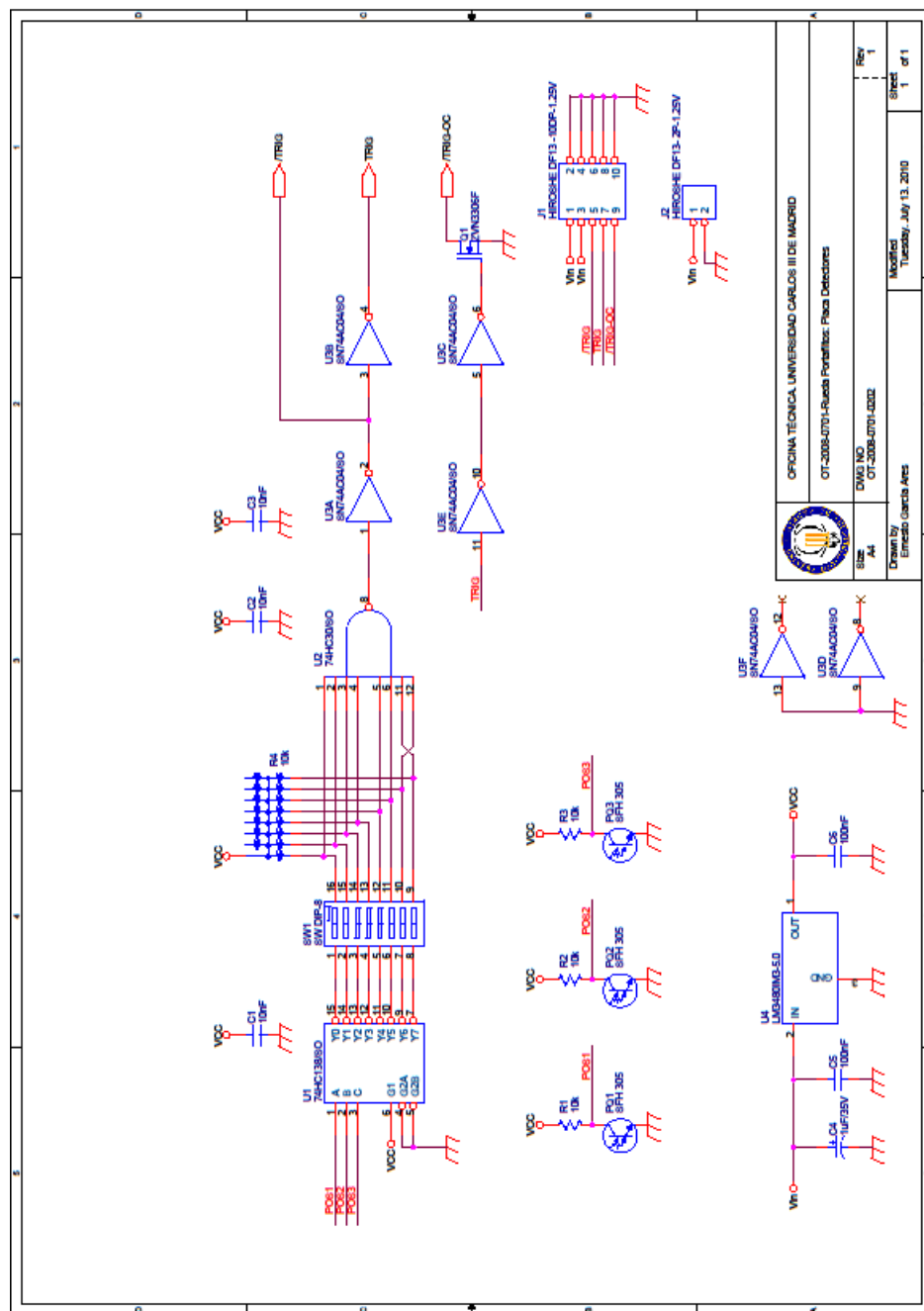


Figura 11.3: Esquema correspondiente al circuito receptor.



Anexo IV. Planos de la rueda portafiltros

Figura 11.4: Vista en 3-D de la rueda portafiltros.

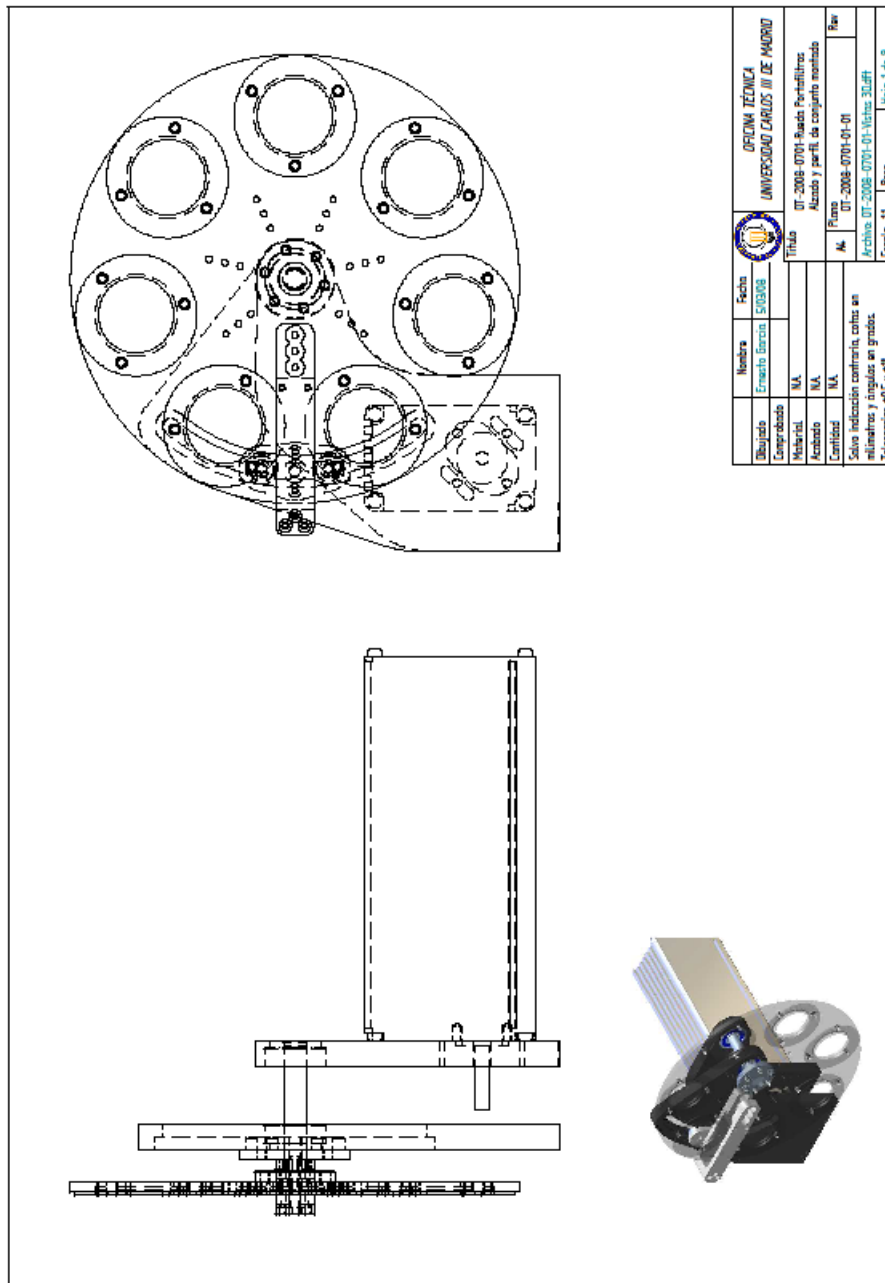


Figura 11.5: Soporte para los LED's.

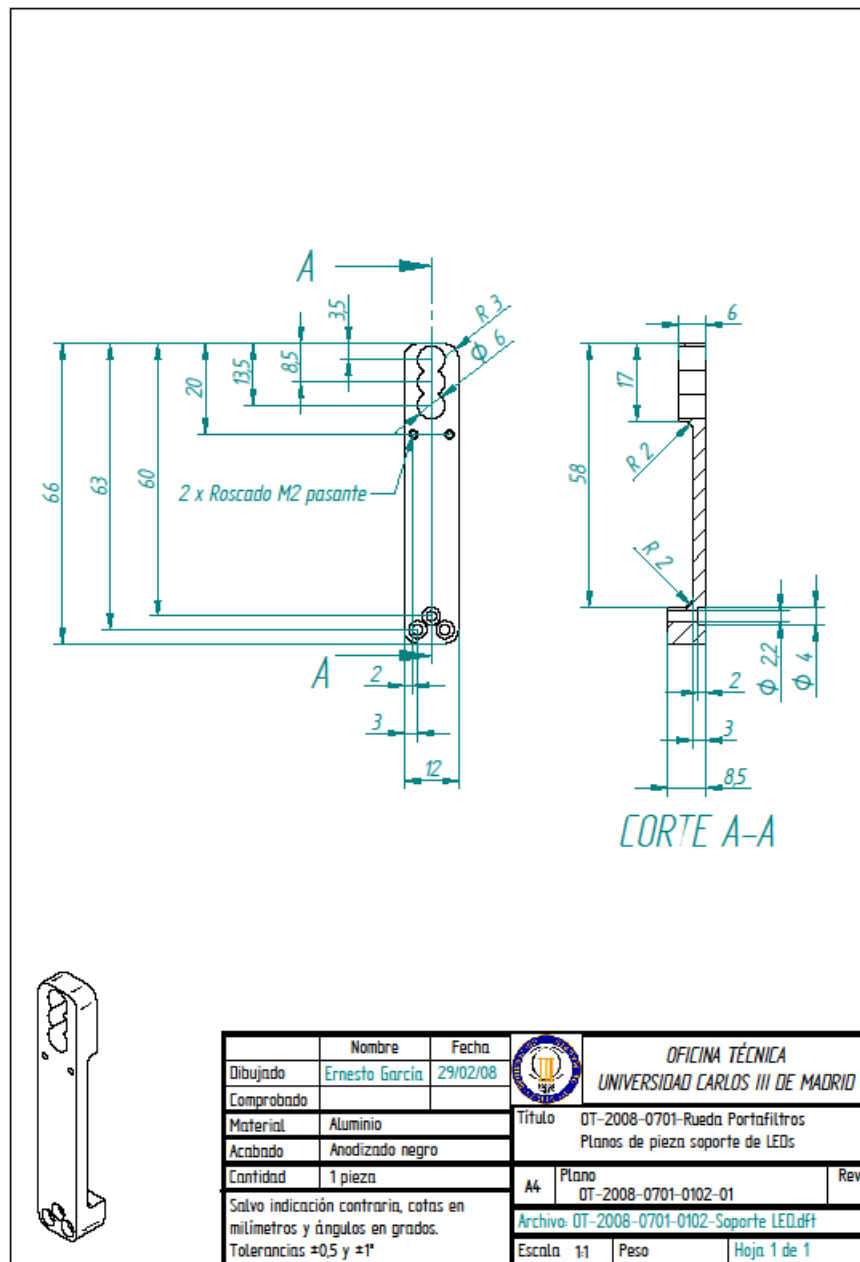
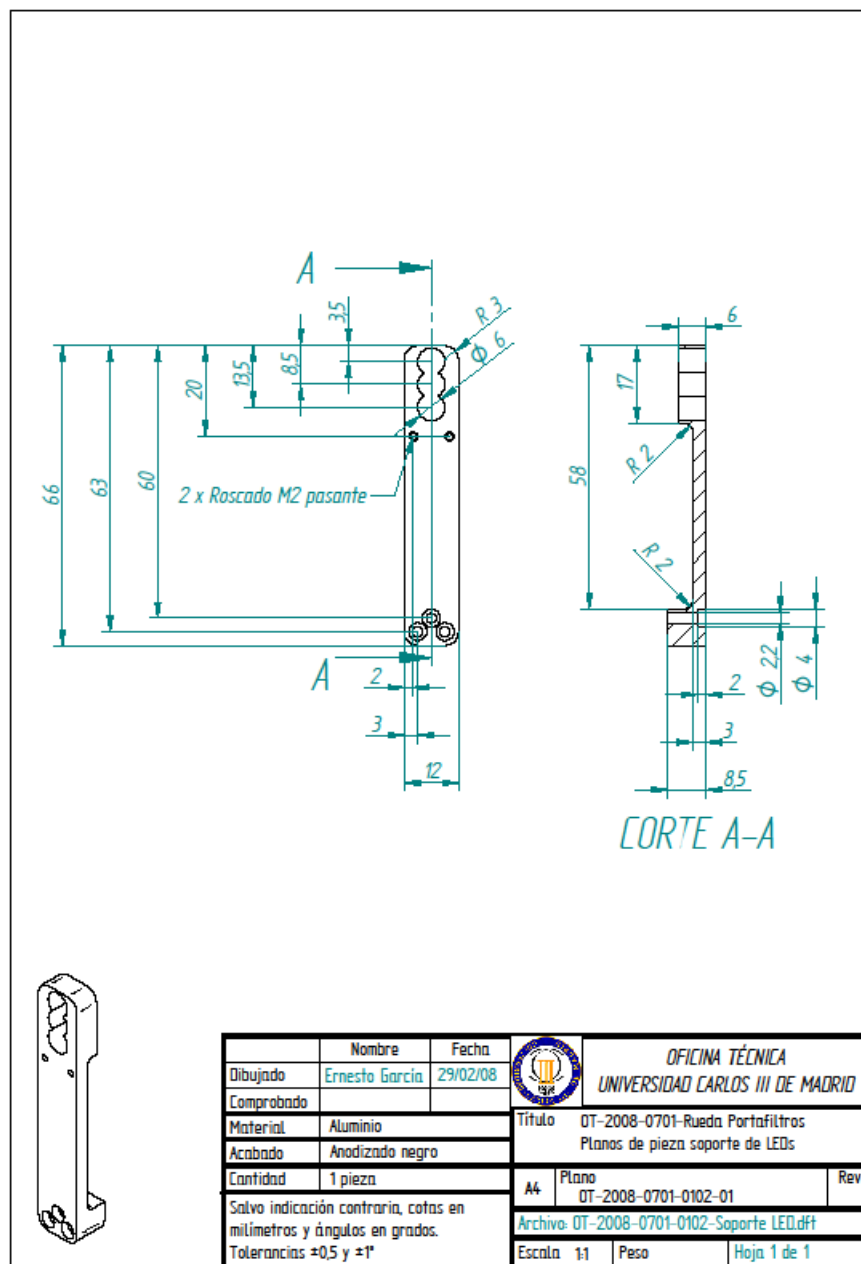


Figura 11.6: Soporte para los detectores.



0.9

10.4

$\phi 7$

R 9

R 9

2 x Roscado M3 pasante

Roscado M4 pasante

DETALLE B

A

9

9

6

6

6

6

R 7

B

A

7

3

22

4

2

CORTE A-A

Technical drawing of a mechanical part, showing a front view, a side view, and a detail of the mounting bracket. The front view shows a curved bracket with a central hole and two side holes. Dimensions include a total width of 112, a central hole diameter of 8, and radii of R10, R25, R70, and R80. The side view shows a total height of 88.8, a base width of 71.2, and a mounting bracket with a width of 12 and a height of 5. The detail shows a mounting bracket with a width of 12 and a height of 5, with a central hole of diameter 8 and a radius of R25. The drawing is labeled "Corte A-A" and "3x Roscado M4 - 12 Prof."

[illegible]

Nomenclatura

ACG Automatic Gain Control

CAN Controller Area Network

CP Componente Principal

D* Detectividad específica

EPOS Easy-to-use Positioning

f Distancia focal

FIR Far InfraRed

FOV Field Of Vision

FPA Focal Plane Array

IFOV Instantaneous Field Of View

IR Infrarroja

LED Laser Emitter Diode

LUT Look Up-Table

MIR Medium InfraRed

MMSE Minimum Mean Square Error

ND Nivel digital

NEP Noise Equivalent Power

NETD Noise Equivalent Temperature Difference

NI National Instruments

NIR Near InfraRed

NTSC National Television System Committee

NUC Non Uniformity Correction

PAL Phase Alternating Line

PCA Principal Component Analysis

PI Proporcional Integral

PID Proporcional Integral Derivativo

ROI Region of Interest

SNR Signal to Noise Ratio

SWIR Short Wave InfraRed

TIR Thermal InfraRed

TTL Transistor Transistor Logic

VI Virtual Instrument

XIR Extreme InfraRed

Bibliografía

- [1] Aranda, J.M, *Espectrometría de imagen en el infrarrojo: una contribución al estudio de las combustiones y a la teledetección de incendios forestales*, Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [2] García, E., *Desarrollo de detectores de infrarrojo fotovoltaicos, de pozo cuántico y doble barrera, para la banda de 3-5 μ m*, Tesis doctoral, Escuela Politécnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, 2004.
- [3] Jha, A.R., *Infrared technology : applications to electrooptics, photonic devices, and sensors*, John Wiley & Sons, 2000.
- [4] Driggers, R.G., *Introduction to infrared and electro-optical systems*, Artech House, 1999.
- [5] Holst, G. C., *Electro-optical imaging system performance*, SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- [6] Henini, M, *Handbook of infrared detection technologies*, Elsevier Advanced Technology, 2002.
- [7] Jolliffe I.T., *Principal Component Analysis*, Springer Series In Statistics, 2002.
- [8] A tutorial on Principal Component Analysis, Lindsey Smith (2002): http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf
- [9] Costa, L.; Oliveira, P., *Biplots in offline multiobjective reduction*, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 18-23 Julio 2010, Barcelona.
- [10] Ogata K., *Ingeniería de control moderna*, Prentice Hall, 2002.

- [11] C. González, R.; E. Woods, R., *Tratamiento Digital de Imágenes*, Addison Wesley-Díaz de Santos.
- [12] Byrnes, J., *Unexploded Ordenance Detection and Mitigation*, Springer, 2009.
- [13] <https://ewhdbks.mugu.navy.mil/transmit.gif>
- [14] Hudson R. D., *Infrared System Engineering*, John Wiley & Sons Inc.
- [15] Ridpath I. , *Astronomía*, Complutense-Oxford.
- [16] Wenjun, L; Bozhi, Y, *Thermography techniques for integrated circuits and semiconductor devices*, Sensor Review, 2007.
- [17] Figueiras, A., *Apuntes de la asignatura: Tratamiento Digital de Señales, Capítulo 10:Clustering*, curso 2008-2009.
- [18] Hart, O.; Hart, E., *Pattern Classification*, John Wiley & Sons, 2001.
- [19] Höpper, F.; Klawonn F., *Fuzzy cluster analysis. Methods for classification, data analysis and image recognition*, John Wiley & Sons, 1999.
- [20] Hudson, Jr.; Richard D., *Infrared System Engineering*, John Wiley & Sons, 1969.
- [21] Ogata, K., *Ingeniería de control moderna*, Prentice Hall, 2003.
- [22] Aranda, J.M.; de Castro A.; Meléndez, J.; Cortés, F.; Fernández-Gómez I.; López, F., *The Design of an Infrared Sensor for the Measurement of Martian Surface Temperature and Gas Concentration*, Proceedings of the 2009 Spanish Conference on Electron Devices, Feb 11-13, 2009. Santiago de Compostela, Spain.
- [23] Lajara, J.R., *LabView : entorno gráfico de programación*, Marcombo, 2007.
- [24] Johnson, G.W., *LabVIEW graphical programming*, McGraw-Hill, 2006.